

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE
CURSO DE ENGENHARIA FERROVIÁRIA E METROVIÁRIA

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DAS FOLGAS DOS CCTs NOS CHOQUES DE
COMPOSIÇÕES FERROVIÁRIAS**

ALINE FERNANDES DE SOUZA

Joinville
2017

Aline Fernandes de Souza

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DAS FOLGAS DOS CCTs NOS CHOQUES DE
COMPOSIÇÕES FERROVIÁRIAS**

Trabalho de conclusão de curso, apresentado como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Ferroviária e Metroviária, no Curso de Engenharia Ferroviária e Metroviária, da Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico de Joinville.

Orientador: Alexandre Mikowski, Dr. Fís.
Coorientador: Thiago da Silva Martins, Esp.

Joinville

2017

ALINE FERNANDES DE SOUZA

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DAS FOLGAS DOS CCTs NOS CHOQUES DE
COMPOSIÇÕES FERROVIÁRIAS**

Este trabalho de conclusão de curso foi julgado adequado para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Ferroviária e Metroviária e aprovado em sua forma final pelo Programa de Graduação em Engenharia Ferroviária e Metroviária da Universidade Federal de Santa Catarina.

Joinville, 23 de junho de 2017.

Banca Examinadora:

Dr. Fís. Alexandre Mikowski
Presidente / Orientador

Esp. Thiago da Silva Martins
Coorientador / Vale S.A.

Esp. Rondinelli dos Santos Juvencio
Membro / Vale S.A.

Dr. Eng. Thiago Antonio Fiorentin
Membro

AGRADECIMENTOS

A minha mãe, Iracy, por ser minha fonte de inspiração eterna. Obrigada por sempre acreditar em mim e me fazer ver o lado bom de todas as situações, me fazendo chegar cada vez mais longe.

Ao meu companheiro e eterno namorado, Thiago, por ser meu porto seguro durante todos os momentos de dúvida e contradição, dando-me carinho, incentivo e apoio, mesmo à distância, e por participar de todas as minhas conquistas.

À Universidade Federal de Santa Catarina, todos seus professores e servidores, e a Vale S.A; por me auxiliarem no aprendizado, na obtenção de conhecimento teórico e prático e na possibilidade de realização deste estudo.

Aos meus orientadores, Alexandre e Thiago, por aceitarem o desafio deste projeto e me auxiliarem durante o desenvolvimento do mesmo.

Aos meus grandes amigos do período do curso: Alfredo, João, Catalina, Thiago e Vinicius, que fizeram meus anos na faculdade mais felizes, sendo nas coisas mais pequenas como conversas, cafés, bolos, ou através dos trabalhos e milhares de viagens de Joinville a Florianópolis.

Aos meus eternos amigos de adolescência, Jéssica, Natacha, Peterson e Werner, por me incentivar e acompanhar por todo meu crescimento.

Ao meu pai e madrasta, Cezar e Arlete, por todo carinho e torcida pelos meus sonhos.

Às grandes novas amizades feitas no período do estágio em Vitória: Lilia, Bruna, Nathália e Izabella, por me acompanharem nessa longa caminhada, incentivando-me e aconselhando-me todos os dias.

Aos meus mestres durante o período estudado na UFSC Joinville, em especial, Viviane Grubisic, Carminatti, Régis, Modesto, Calil e Elisete, por acreditarem no meu potencial e me aconselhar nos momentos de dúvidas.

Aos grandes mestres do Centro de Engenharia Logística (CEL) da Vale S.A., por todo auxílio nas dúvidas diárias e apoio para a conclusão deste trabalho. Deixo um agradecimento especial a Ronilson, Eustáquio, Alvim e Rondinelli pela gigantesca oportunidade e confiança colocada em mim durante o projeto desenvolvido. O conhecimento que vocês me proporcionaram é indescritível.

A todos os amigos e família que me incentivaram para a conclusão deste projeto.

“The secret of change is to focus all
of your energy, not fighting the old,
but on building the new”

Dan Millman, 1980.

RESUMO

O transporte ferroviário de cargas brasileiro obteve um crescimento expressivo de 133% ao longo de 16 anos, gerando o aumento dos lucros, investimentos e quantidade de carga transportada, que reflete na quantidade de veículos nas vias e na quantidade de toneladas transportadas por eixos (CNT, 2013). A massa dos carros (locomotivas e vagões) e a distância entre eles são fatores que influenciam fortemente a dinâmica longitudinal de uma composição ferroviária, podendo gerar elevados valores de choques nas conexões entre os carros, que são dissipados pelos Conjuntos de Choque e Tração (CCT). O presente trabalho visa mostrar a relação entre o distanciamento das conexões entre os vagões, geradas pelas Folgas Livres nos CCTs, e o aumento dos valores de choques durante a operação de trens longos e de alta capacidade de transporte e de elevada carga por eixo (*Heavy Haul*). Como metodologia, foram selecionados 2 tipos de distribuições de Folgas Livres na extensão da composição, de forma homogênea e heterogênea, separados em 10 cenários, e analisados com o Simulador de Operação Ferroviária ALION Simulator 6.2. A partir dos resultados obtidos, foi possível demonstrar a correlação entre as variáveis de folga e choque e a região de maior atuação dos choques.

PALAVRAS-CHAVE: Conjunto de Choque e Tração. Dinâmica Longitudinal. Folga livre. Simulação ferroviária. ALION.

ABSTRACT

The Brazilian freight transportation obtained an expressive growth of 133% over 16 years, resulting in the increase of profits, investments and quantity of transported cargo, which reflects on the quantity of vehicles in the ways and on the quantity of tons transported per axle (CNT, 2013). The cars' mass (locomotive and wagons) and the distance between them are factors that strongly influence the longitudinal dynamics of a railroad composition, which can result in elevated collisions values in the cars' connections, that are dissipated by the Draft System. The present work aims to show the relation between the wagon connections' clearance, resulted by the Free Slack in the Draft Systems, and the increase of the collisions' values during the operation of Heavy Haul Trains. As methodology, there were chosen 2 types of Free Slacks distributions in the train extension, homogeneous and heterogeneous, divided in 10 scenarios and analyzed with the Railroad Operation Simulator ALION Simulator 6.2. From the obtained results, it was possible to demonstrate the correlation between the Slack variables and the collisions and the region with the high actuation of the collisions.

KEY WORDS: Draft System. Longitudinal Dynamics. Free Slack. Railroad simulation. ALION.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Representação em CAD de uma dupla de vagões.....	22
Figura 2 – Ilustração de um acoplamento, por volta de 1850.	23
Figura 3 – Representação esquemática do engate tipo F, em vista superior e lateral.	24
Figura 4 – Fotografia do corpo do engate.	25
Figura 5 – Esquemático do corpo dos engates fixo e rotativo.....	25
Figura 6 – Fotografia de uma mandíbula.....	26
Figura 7 – Fotografia de uma castanha.....	26
Figura 8 – Fotografias de (a) Levantador Superior, (b) Acionador e (c) Pino da Mandíbula. .	27
Figura 9 – Fotografia de um rotor.	27
Figura 10 – Representação esquemática em CAD do Engate tipo F montado.....	28
Figura 11 – Fotografia de um acoplamento entre engates do tipo F e sua flexibilidade.	29
Figura 12 – Esquemático de uma haste de ligação.....	29
Figura 13 – Esquemático de uma braçadeira Y-45.....	30
Figura 14 – Fotografias de cruzetas para sistemas fixos e rotativos.	30
Figura 15 – Fotografia de um colar.	31
Figura 16 – Fotografia de um espelho.....	31
Figura 17 – Representação em CAD de um batente.....	32
Figura 18 – Representação esquemática em CAD de um pino de conexão no CCT.	32
Figura 19 – Esquemático do Aparelho de Choque e Tração Mark 50 em corte.....	33
Figura 20 – Representação esquemática da: (a) Compressão inicial; (b) Compressão parcial; (c) Compressão total e início da descompressão; (d) Descompressão parcial.	34
Figura 21 – Representação esquemática do comportamento de compressão do CCT.	36
Figura 22 – Representação esquemática do comportamento de tração do CCT.	36
Figura 23 – Fotografia do procedimento para obtenção da Folga Livre.	39

Figura 24 – Representação esquemática das medidas das Folgas máxima, mínima e Folga Livre.	39
Figura 25 – Representação esquemática da Folga Livre A.	40
Figura 26 – Representação esquemática do curso de trabalho do ACT.	41
Figura 27 – Representação esquemática do modelo de trem de três massas.....	44
Figura 28 – Representação esquemática do diferencial de velocidades.....	46
Figura 29 – Representação das estruturas de distribuição dos impactos.	48
Figura 30 – Representação esquemática do contato roda-trilho.....	49
Figura 31 – Representação esquemática da alta taxa de frenagem pneumática ou dinâmica em curva.	50
Figura 32 – Representação esquemática de uma locomotiva de auxilio empurrando vagões leves contra vagões pesados.	51
Figura 33 – Representação esquemática do procedimento para obtenção da Folga Livre.....	54
Figura 34 – Fotografia de um Locotrator.	55
Figura 35 – Fotografia da Folga de Mandíbula.	57
Figura 36 – Fotografia do simulador ferroviário Alion Simulator 6.2.	59
Figura 37 – Tela de simulação do ALION Simulator 6.2.	60
Figura 38 – Tela do ALION Simulator 6.2 para o cenário 1.....	67
Figura 39 – Representação da aplicação de UDE no cenário 2.....	70
Figura 40 – Representação do trem em rampa ascendente.....	73
Figura 41 – Representação do trem em bacia.....	77

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Aumento da Folga Total proporcional ao aumento do trem.....	42
Tabela 2 – Relação entre diferencial de velocidade e impacto.....	47
Tabela 3 – Valores das medidas de Folga Livre com utilização de locomotiva.	55
Tabela 4 – Valores das medidas de Folga Livre com utilização do Locotrator.	56
Tabela 5 – Valores das medidas de Folga de Mandíbula.	58
Tabela 6 – Folgas Totais utilizadas nas simulações.	62
Tabela 7 – Cálculo do coeficiente de Pearson para o cenário 1.	68
Tabela 8 – Aumento percentual dos choques máximos em relação às Folgas para o cenário 2.	71
Tabela 9 – Cálculo do coeficiente de Pearson para o cenário 2.	71
Tabela 10 – Aumento percentual dos choques em vagões ao longo da composição, para o cenário 2.	72
Tabela 11 – Aumento percentual dos choques de compressão máximos em relação às Folgas Totais para o cenário 3.....	75
Tabela 12 – Cálculo do coeficiente de Pearson para o cenário 3.	75
Tabela 13 – Aumento percentual dos choques de compressão em vagões ao longo da composição, para o cenário 3.	76
Tabela 14 – Aumento percentual dos choques máximos em relação às Folgas para o cenário 4.	79
Tabela 15 – Cálculo do coeficiente de Pearson para o cenário 4.	79
Tabela 16 – Aumento percentual do deslocamento das linhas de tendência das distribuições de choques de compressão, para o cenário 4.....	81
Tabela 17 – Posição dos vagões com folgas alternadas.	81
Tabela 18 – Comparação entre os cenários 5 e 10.	82
Tabela 19 – Comparação entre os cenários 6 e 10.	84
Tabela 20 – Comparação entre os cenários 7 e 10.	85

Tabela 21 – Comparação entre os cenários 8 e 10.	87
Tabela 22 – Comparação entre os cenários 9 e 10.	88

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Matriz de transportes brasileira, considerando o transporte ferroviário com e sem o minério de ferro.	18
Gráfico 2 – Comparativo entre os modais rodoviário e ferroviário.	19
Gráfico 3 – Curva característica de um Conjunto de Choque e Tração genérico.	37
Gráfico 4 – Representação das medidas de Folga Livre com utilização de locomotiva.	54
Gráfico 5 – Representação das medidas de Folga Livre com utilização do Locotrator.	56
Gráfico 6 – Medição da Folga de Mandíbula.	57
Gráfico 7 – Distribuição dos maiores valores de choques de tração em relação às Folgas Totais para o cenário 1.	67
Gráfico 8 – Distribuição dos choques de tração em relação a posição do vagão para o cenário 1.	68
Gráfico 9 – Distribuição dos maiores valores de choques de compressão em relação às Folgas Totais para o cenário 2.	70
Gráfico 10 – Distribuição dos choques de compressão em relação a posição do vagão para o cenário 2.	71
Gráfico 11 – Distribuição dos maiores valores de choques de compressão em relação às Folgas Totais para o cenário 3.	74
Gráfico 12 – Distribuição dos choques de compressão em relação a posição do vagão para o cenário 3.	74
Gráfico 13 – Distribuição dos maiores valores de choques de compressão em relação às Folgas Totais para o cenário 4.	78
Gráfico 14 – Distribuição dos choques de compressão em relação a posição do vagão para o cenário 4.	78
Gráfico 15: Representação das linhas de tendência das distribuições de choques de compressão do cenário 4.	80
Gráfico 16 – Distribuição de choques em relação às Folgas para o cenário 5 e 10, respectivamente.	82
Gráfico 17 – Distribuição de choques em relação às Folgas para o cenário 6 e 10, respectivamente.	83

Gráfico 18 – Distribuição de choques em relação às Folgas para o cenário 7 e 10, respectivamente.	85
Gráfico 19 – Distribuição de choques em relação às Folgas para o cenário 8 e 10, respectivamente.	86
Gráfico 20 – Distribuição de choques em relação às Folgas para o cenário 9 e 10, respectivamente.	87

LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACT	Aparelho de Choque e Tração
AAR	<i>Association of American Railroads</i>
CAD	<i>Computer Aided Design</i>
CCT	Conjunto de Choque e Tração
EFVM	Estrada de Ferro Vitória a Minas
FRA	Federal Railroad Administration
GDE	Vagão gôndola para descarregamento em viradores de vagão e bitola métrica
L/V	Relação de forças laterais e verticais
TOES	<i>Train Operation and Energy Simulation</i>
TTCI	<i>Transportation Technology Center Incorporation</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

F_L	Folga Livre
$F_{m\acute{a}x}$	Folga máxima
$F_{m\acute{i}n}$	Folga mínima
C_{ACT}	Curso de trabalho do Aparelho de Choque e Tração
F_T	Folga Total
F_m	Folga de Mandíbula
ΔF	Diferença entre valores de Folgas
F_g	Forças de grade
F_r	Forças de retardação
$F_{t/dh}$	Força motriz da locomotiva
F_{pr}	Resistência de propulsão
F_{cr}	Resistência de curvatura
F_b	Resistência de frenagem
m_i	Massa do vagão
a_i	Aceleração do vagão
k_i	Constante de mola do acoplamento
c_i	Constante de amortecimento do acoplamento
f_{wc}	Função não linear que descreve todas as características da conexão entre vagões
ΔE_c	Diferencial de energia mecânica
P	Peso do vagão
v	Velocidade
g	Aceleração da gravidade
F_i	Força de impacto
d	Distância

SUMÁRIO

1 -	INTRODUÇÃO	18
1.1 -	Objetivo	20
1.1.1 -	Objetivo Geral.....	21
1.1.2 -	Objetivos Específicos	21
2 -	CONJUNTO DE CHOQUE E TRAÇÃO	22
2.1 -	Engate	23
2.1.1 -	Corpo do Engate	24
2.1.2 -	Mandíbula	25
2.1.3 -	Castanha.....	26
2.1.4 -	Levantador Superior, Acionador e Pino da Mandíbula	26
2.1.5 -	Rotor	27
2.2 -	Haste de Ligação.....	29
2.3 -	Componentes rígidos internos ao <i>Center Sill</i>	29
2.3.1 -	Braçadeira	30
2.3.2 -	Cruzeta.....	30
2.3.3 -	Colar.....	31
2.3.4 -	Bolso do Conjunto de Choque e Tração e Espelho	31
2.3.5 -	Batentes e Placa de Suporte	32
2.3.6 -	Chave de Conexão	32
2.4 -	Aparelho de Choque e Tração	33
2.5 -	Funcionamento do CCT	35
2.5.1 -	Compressão	35
2.5.2 -	Tração.....	36
3 -	FOLGAS NO CONJUNTO DE CHOQUE E TRAÇÃO	38
3.1 -	Folga Livre	38
3.2 -	Curso do Aparelho de Choque e Tração	40
3.3 -	Folga Total	41
4 -	RELAÇÃO ENTRE FOLGAS E CHOQUES EM COMPOSIÇÕES	43
4.1 -	Dinâmica Longitudinal do Trem	43
4.2 -	Diferencial de Velocidades	46
4.3 -	Relação com as Forças Laterais e Verticais	48

5 - ESTUDO DA INFLUÊNCIA DAS FOLGAS NA DINÂMICA LONGITUDINAL	53
5.1 - Metodologia empregada para medição da Folga Livre	53
5.1.1 - Medição com uso de Locomotiva	54
5.1.2 - Medição com o uso de Locotrator	55
5.1.3 - Medição da Folga de Mandíbula	57
5.2 - ALION Simulator 6.2.....	58
5.3 - Metodologia empregada nas simulações com o ALION Simulator 6.2.....	61
5.3.1 - Simulações Homogêneas.....	62
5.3.2 - Simulações Heterogêneas.....	63
6 - RESULTADOS E DISCUSSÃO	66
6.1 - Simulações Homogêneas.....	66
6.2 - Simulações Heterogêneas.....	81
6.3 - Modelo para distribuição de Folgas	88
7 - CONSIDERAÇÕES FINAIS	90
7.1 - Conclusões	90
7.2 - Sugestões para trabalhos futuros	91
REFERÊNCIAS	92

1 - INTRODUÇÃO

Vários são os fatores decisivos para o desenvolvimento de países e regiões, sendo um deles e de grande importância, um sistema de transporte eficiente. A combinação dos processos de globalização econômica, liberação comercial e inovações tecnológicas gerou uma nova visão de mercado, onde vantagens competitivas e comparativas foram postas em forma, aumentando as exigências em regiões com alto custo logístico (CNT, 2013).

O Brasil é conhecido por ter uma matriz de transportes desbalanceada, onde o transporte rodoviário tem uma predominância de 52%, seguido do ferroviário, com 30%, como pode ser visto no Gráfico 1. A participação do modal ferroviário diminuiu para 10% quando não é considerado o transporte de minério de ferro no país, que é o produto mais escoado através deste meio. Esta matriz comprova a predominância do transporte rodoviário em relação aos outros modais, assim como a possibilidade de expansão do transporte ferroviário como um todo (SPNT, 2012).

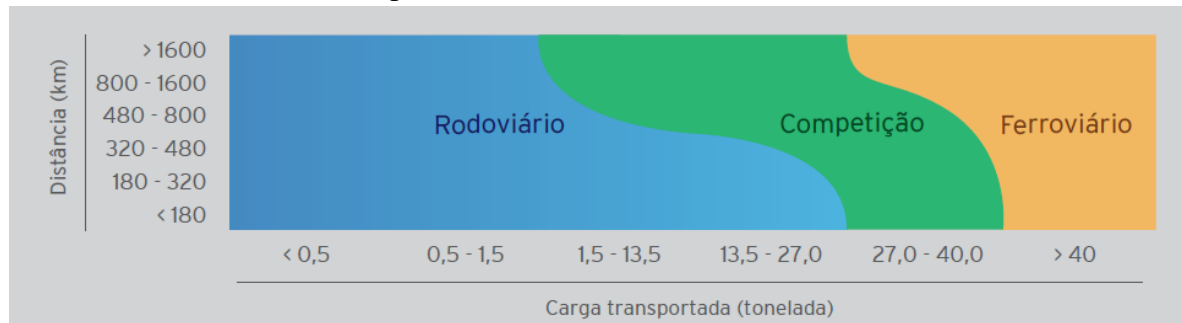
Gráfico 1 – Matriz de transportes brasileira, considerando o transporte ferroviário com e sem o minério de ferro.



Fonte: SPNT, 2012.

A vantagem mais predominante do transporte ferroviário é sua elevada capacidade de transporte, por distâncias longas, em comparação ao modal rodoviário, conforme demonstrado no Gráfico 2, abaixo (CNT, 2013).

Gráfico 2 – Comparativo entre os modais rodoviário e ferroviário.



Fonte: CNT, 2013.

A zona de competição entre os dois modais dá-se para o transporte entre 27 à 40 toneladas, onde a distância percorrida é predominante para a escolha. Já para transportes feitos com capacidade superior, o transporte ferroviário é o mais indicado, independentemente da distância percorrida (CNT, 2013).

O transporte por linhas férreas também possui outras vantagens, como menores custos ambientais, já que as locomotivas emitem menos gases poluentes (em relação à mesma quantidade de veículos rodoviários necessários para transportar a mesma carga) e a construção das linhas gera um menor impacto ambiental. A segurança neste modal também é elevada, onde a quantidade de acidentes é proporcionalmente inferior ao rodoviário, diminuindo os custos sociais (CNT, 2013).

A movimentação de cargas via o modal ferroviário envolve a atuação de diversas operações, como acelerações, frenagens e paradas, sendo desenvolvidas em diferentes condições climáticas e de topografia. Estas operações resultam em interações dinâmicas nos vagões e locomotivas, tanto no sentido longitudinal, quanto entre os veículos e a via permanente (BARBOSA, 1993).

Segundo Barbosa (1993), as forças longitudinais contribuem significativamente para as condições de segurança na operação ferroviária, sendo transmitidas entre os acoplamentos dos vagões e locomotivas. Para garantir que os veículos possam aceitar estes movimentos gerados, sem causar danos aos equipamentos e/ou à carga, a composição deve possuir um sistema de absorção destas forças, também chamadas de choques (Wabtec Corporation, 2003).

O *Draft System*, conhecido em português como Conjunto de Choque e Tração (CCT), é projetado para absorver a energia mecânica gerada nos choques devido ao movimento, sem resultar em danos irreversíveis aos veículos ou carga. Com a utilização dos sistemas de absorção de choque é possível a operação de trens cada vez mais pesados, a distâncias cada vez maiores (PROFIDILIS, 2005).

Ainda, segundo Barbosa (1993), as componentes dos esforços longitudinais em trens longos podem gerar graves danos à segurança da operação ferroviária, podendo ocasionar o descarrilamento das composições. Ele cita como problemas relacionados a estas forças, quando atuantes de forma elevada:

- i) Dificuldades na operação de carga e descarga;
- ii) Dificuldades de circulação, com elevada distância de parada, inércia de partida, etc;
- iii) Quebra de engates devido as forças alcançarem níveis críticos;
- iv) Risco de descarrilamento devido às forças de compressão (efeito conhecido como canivete);
- v) Risco de descarrilamento devido às forças de tração elevadas (efeito corda).

Cole (2006) afirma que a dinâmica longitudinal do trem tem uma ligação direta com a estabilidade das composições e a conecta com as folgas provenientes dos engates. Essas duas condições estão ligadas à gestão energética dos trens, sendo que a operação de trens maiores leva a consequências energéticas para a parada dos mesmos de forma mais significativa.

Um dos objetivos do estudo da dinâmica dos veículos ferroviários é o desenvolvimento de modelos matemáticos suficientemente detalhados e validados que possam permitir a simulação da ação real, em um determinado trecho, para que a performance de um determinado parâmetro seja avaliada (WICKENS, 2003).

Dentro da discussão apresentada, o trabalho abordará a possível relação entre as folgas nos Conjuntos de Choque e Tração e a dinâmica longitudinal das composições, apresentando-a de forma gráfica, através de estudos em simulador de Dinâmica e Operação Ferroviária.

1.1 - Objetivo

Os objetivos do presente trabalho serão apresentados a seguir.

1.1.1 - Objetivo Geral

Analisar a influência das folgas dos Conjuntos de Choque e Tração (CCT) na dinâmica ferroviária longitudinal das composições longas de vagões do tipo gôndola GDE, com a utilização do simulador de Operação Ferroviária ALION Simulator 6.2.

1.1.2 - Objetivos Específicos

- i. Efetuar uma revisão bibliográfica do Conjunto de Choque e Tração (CCT), apresentando os seus componentes e o princípio de funcionamento;
- ii. Efetuar uma revisão bibliográfica das folgas no CCT, apresentando informações quantitativas, conforme normas do setor ferroviário;
- iii. Estimar, através de amostragem empírica, a atual situação das folgas dos CCTs da frota de vagões GDE da Estrada de Ferro Vitória a Minas (EFVM);
- iv. Comprovar, através do simulador de Operação Ferroviária ALION Simulator 6.2, que as folgas e suas variações no CCTs influenciam na dinâmica longitudinal trem-via;
- v. Indicar um modelo de distribuição de folgas dos CCTs, nas composições simuladas com o ALION Simulator 6.2, para uma representação mais fidedigna ao estudo de caso dos trens da EFVM.

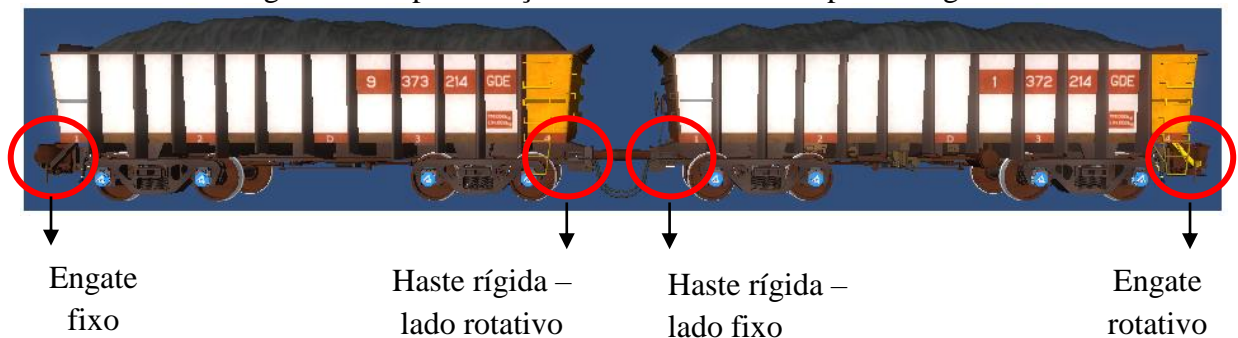
2 - CONJUNTO DE CHOQUE E TRAÇÃO

O Conjunto de Choque e Tração (CCT) é o equipamento responsável pela conexão entre os veículos ferroviários, sejam eles vagões, locomotivas ou outros. Este componente, além da função inicial, tem como premissa transmitir os esforços (tensões), tanto de tração, quanto de compressão do comboio, de maneira atenuada para o corpo do veículo (ROSA, SALES E SISDELLI, 2007).

O corpo do CCT pode ser dividido em duas estruturas básicas: o Engate e o Aparelho de Choque e Tração. O primeiro é responsável pelo acoplamento, propriamente dito, enquanto o segundo absorve energia mecânica, através de uma estrutura de molas e cunhas de fricção, os esforços gerados pela operação ferroviária e os redireciona de maneira atenuada. O CCT pode também possuir uma estrutura de haste fixa, utilizada em substituição aos engates, tornando uma dupla de vagões solidários (VITÓRIA, 2006).

Os vagões em estudo são divididos em duplas, que são conectadas com engates fixos e rotativos, vistos na Figura 1. Isto permite que um par de vagões seja rotacionado ao redor do eixo relativo do carro adjacente, permitindo o descarregamento dos vagões de forma mais eficiente, através do *Car Dumper*. Para a conexão das duplas de vagões, hastes rígidas são utilizadas (KOVALEV et al., 2016).

Figura 1 – Representação em CAD de uma dupla de vagões.

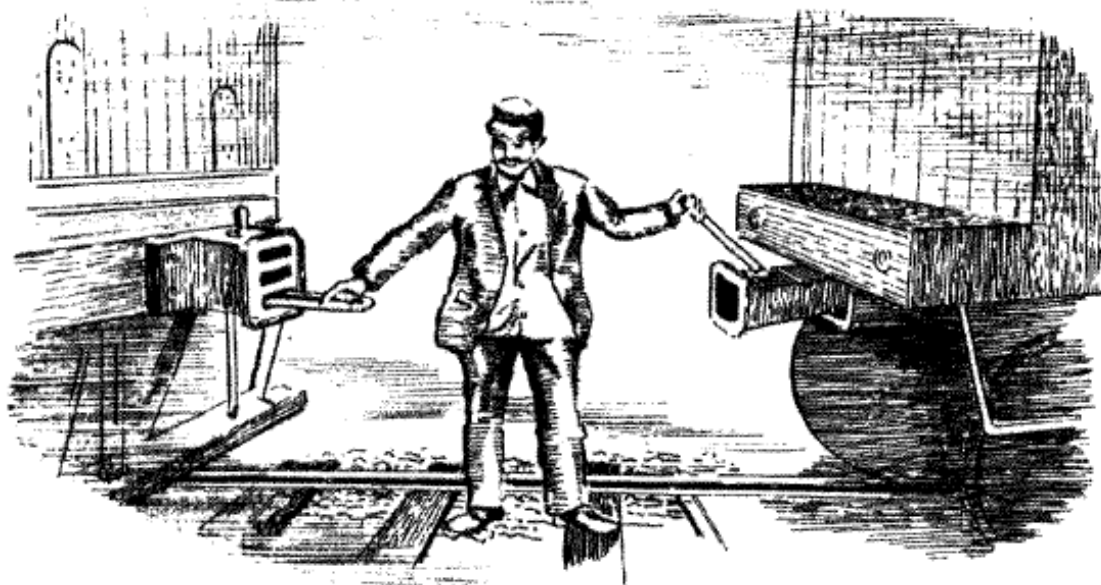


Fonte: Acervo Vale.

2.1 - Engate

Os engates são equipamentos considerados básicos, permitindo o acoplamento entre os veículos ferroviários de maneira segura e prática. No começo do transporte ferroviário, o acoplamento de vagões era feito de maneira manual através de manilhas horizontais fixadas por pinos, operada por “manobreiros”, que permaneciam entre os vagões para garantir o engate e, muitas vezes, correndo riscos de vida, como pode ser visto na Figura 2 (ROSA, 2000).

Figura 2 – Ilustração de um acoplamento, por volta de 1850.



Fonte: Rosa, Sales e Sisdelli, 2007.

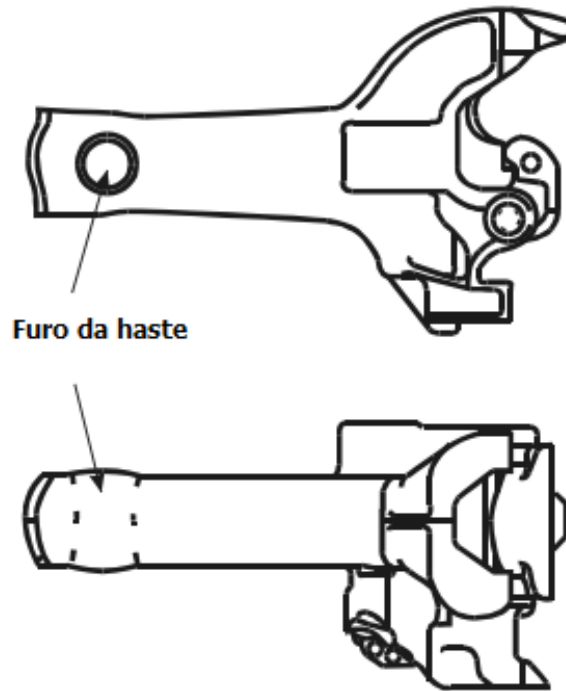
Pensando na diminuição dos acidentes ferroviários e melhoria do sistema de engates, em 1873 foi desenvolvido o primeiro engate automático que, após uma série de incrementos e melhorias, foi implementado e auxiliou no intercâmbio de vagões entre as ferrovias americanas, tendo seu sistema de engates padronizado (ROSA, 2000).

Após diversos desenvolvimentos no setor, vários modelos de engates foram implementados, sendo as variações conhecidas como E e F as mais difundidas e utilizadas internacionalmente, até nos dias atuais. O tipo de engate é definido pelo tipo de veículo e sua utilização (WABTEC CORPORATION, 2003).

Segundo MRS (2008), o engate tipo F, conforme apresentado na Figura 3, surgiu a partir de uma necessidade operacional, onde os vagões necessitavam ser restringidos de movimentos verticais. Assim, os vagões utilizados em trens tipo unitário, onde a estabilidade é fator primordial para a segurança da operação, foram adotados engates com sistemas de

travamento, conhecido como *interlocking*. Esse passo foi dado juntamente com o crescimento logístico e a criação de novas formas de descarrego dos vagões, conhecido como *Car Dumper*. Essa atualização gerou o desenvolvimento de versões rotativas e fixas do engate F.

Figura 3 – Representação esquemática do engate tipo F, em vista superior e lateral.



Fonte: Adaptado de Wabtec Corporation, 2003.

Nas seções seguintes serão especificados cada parte do engate tipo F e suas funções.

2.1.1 - Corpo do Engate

É a maior parte do engate, sendo um das primeiras peças a absorver e transferir a energia mecânica dos choques a todo o conjunto de absorção. Recebe os demais componentes para cumprir suas principais funções: acoplar os vagões, mantê-los acoplados e desacoplá-los na região conhecida como cabeça. A região mais alongada, haste, é conectada a outras partes do conjunto para transferência dos choques através de um furo para pino. Na Figura 4 vemos um exemplo do corpo do engate (SEID, 2015).

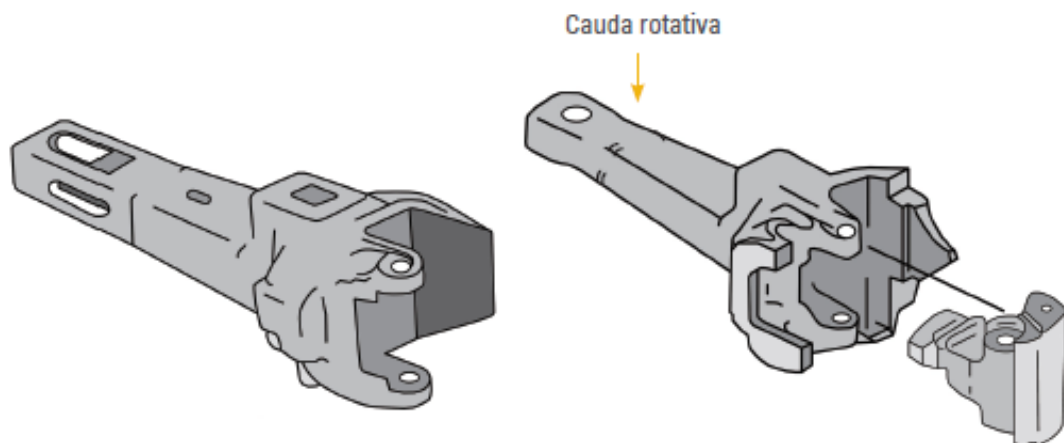
Figura 4 – Fotografia do corpo do engate.



Fonte: Autoria própria, 2017.

Segundo Valer (2008), o corpo do engate fixo e rotativo possui características similares, diferindo nos seguintes aspectos: a cauda do engate rotativo é arredondada, em comparação ao engate fixo, com extremidade retangular. Essa diferença pode ser vista na Figura 5.

Figura 5 – Esquemático do corpo dos engates fixo e rotativo.



Fonte: Adaptado de Valer, 2008.

2.1.2 - Mandíbula

A mandíbula é uma garra fixada ao corpo do engate e presa por um pino, tendo a função de acoplar os veículos. Esta peça sofre diretamente os impactos do acoplamento e dos ajustes de folgas dos engates e pode ser vista na Figura 6 (VALE, 2008).

Figura 6 – Fotografia de uma mandíbula.



Fonte: Vale, 2008.

2.1.3 - Castanha

Vista na Figura 7, a castanha é a peça que garante o travamento da mandíbula, assegurando o acoplamento (VALE, 2008).

Figura 7 – Fotografia de uma castanha.

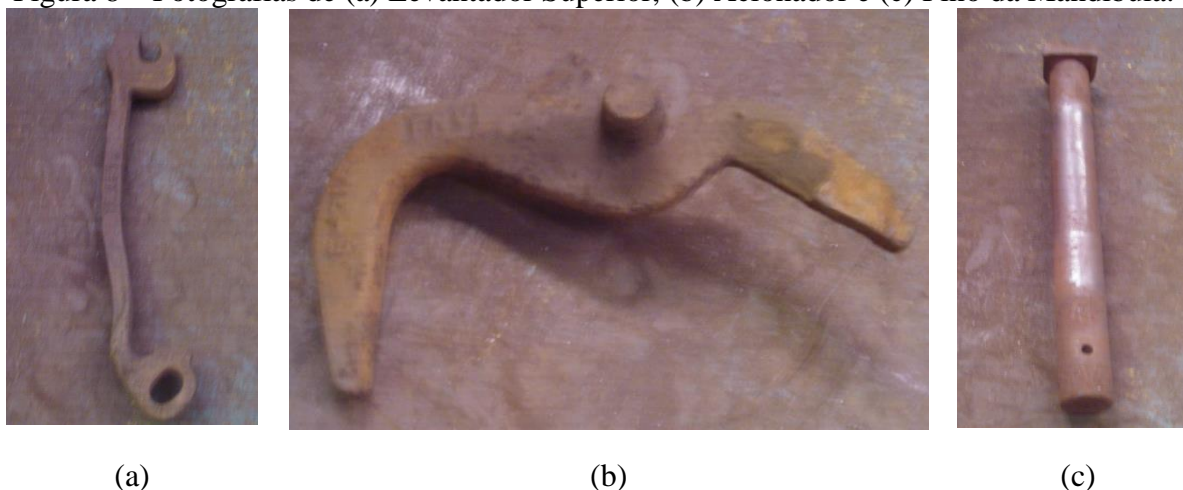


Fonte: Vale, 2008.

2.1.4 - Levantador Superior, Acionador e Pino da Mandíbula

Segundo Vale (2008), o primeiro tem como função levantar a castanha, permitindo o desengate do vagão, sendo acionado através do rotor (Fig. 8 (a)). O segundo abre a mandíbula, quando a castanha é acionada pelo levantador superior (Fig. 8 (b)). Já o terceiro fixa a mandíbula em sua sede, no corpo do engate (Fig. 8 (c)). Um exemplo de cada componente está disponível na Figura 8.

Figura 8 – Fotografias de (a) Levantador Superior, (b) Acionador e (c) Pino da Mandíbula.



Fonte: Vale, 2008.

2.1.5 - Rotor

Visto na Figura 9, é o componente preso ao levantador através de um pino, encaixado na parte inferior do engate. Quando acionado pela alavanca de manobra, o rotor transmite o movimento ao levantador superior, elevando a mandíbula e desprendendo-a (VALE, 2008).

Figura 9 – Fotografia de um rotor.



Fonte: Vale, 2008.

Todos os componentes citados, combinados, montam o engate tipo F, mostrado na Figura 10.

Figura 10 – Representação esquemática em CAD do Engate tipo F montado.



Fonte: Acervo Vale.

O engate trabalha de maneira simples, onde a mandíbula é conectada a uma peça, chamada de castanha, na cauda da mandíbula. Essa peça é responsável pelo travamento da mandíbula no seu devido lugar, através de um movimento vertical. Durante a operação, o oficial de operação gira uma alavanca conectada ao fundo da castanha, levantando-a e liberando a mandíbula, que fica livre para girar e abrir. Quando o acoplamento é realizado através do choque dos vagões, a castanha “cai” (volta para a posição inicial) e bloqueia a mandíbula, assegurando o acoplamento (ROSA, 2000).

Segundo Rosa (2000), durante a operação, este modelo de engate consegue absorver as irregularidades da via, mesmo com a restrição vertical, através de uma folga entre a haste e o pino de fixação. Essa liberdade ocorre somente se as extremidades da viga central possuir espelhos com bases flexíveis, gerando uma maior folga entre o topo do espelho e a cauda do engate. Na Figura 11 é possível entender este aspecto.

Figura 11 – Fotografia de um acoplamento entre engates do tipo F e sua flexibilidade.



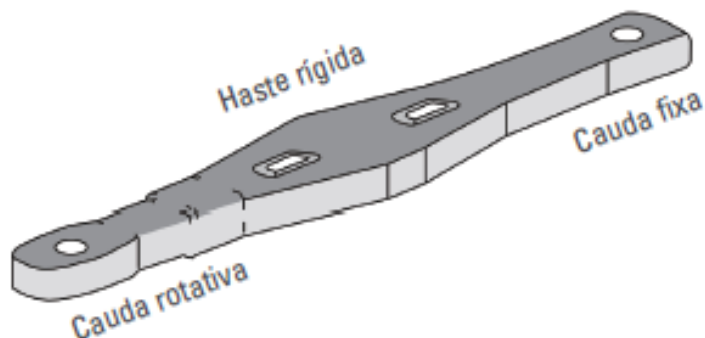
Fonte: MRS, 2008.

2.2 - Haste de Ligação

A haste de ligação, também conhecida como rígida, é o componente utilizado para o acoplamento de dois vagões de minério, formando uma dupla geminada, sendo um corpo em forma de haste que possui dois tipos de caudas, uma fixa e outra rotativa (KOVALEV, 2016).

Podemos diferenciar um engate rotativo do fixo, através da observação da sua cauda, que no rotativo é arredondada e no fixo é retangular, como visto na Figura 12.

Figura 12 – Esquemático de uma haste de ligação.



Fonte: Valer, 2008.

2.3 - Componentes rígidos internos ao *Center Sill*

O *Center Sill*, também conhecido como longarina central, é a parte do vagão onde o CCT será instalado. Nesta seção serão abordados todos os componentes que são instalados internamente nesta parte do vagão.

2.3.1 - Braçadeira

A braçadeira é a peça que aloja os componentes para distribuição dos choques e conecta o engate aos aparelhos de choque e tração, fazendo com que os dois trabalhem de forma adequada (SEID, 2015). O tipo básico de braçadeira mais utilizada para engates tipo F é a Y-45, contando com furo para pino, segundo Wabtec Corporation (2003). Na Figura 13, vemos um exemplo de braçadeira.

Figura 13 – Esquemático de uma braçadeira Y-45.

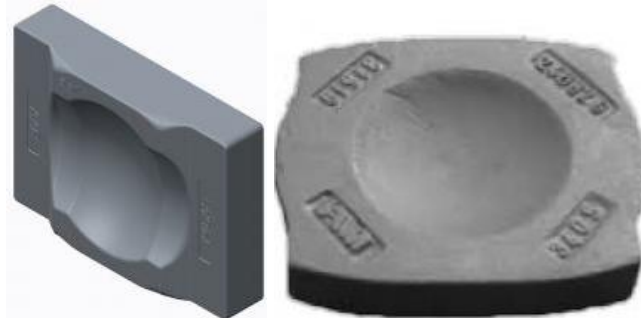


Fonte: MRS, 2008.

2.3.2 - Cruzeta

A cruzeta é uma placa de metal retangular colocada dentro da braçadeira e em frente ao aparelho de choque e tração. Ela age transmitindo os esforços gerados no aparelho de choque e tração na posição de tração para a longarina central do vagão, também conhecida como *Center Sill* (WABTEC CORPORATION, 2003). São separadas em formas para engates fixos e rotativos, vistos na Figura 14, e também na forma de cruzeta lisa, colocada juntamente às cruzetas rotativas.

Figura 14 – Fotografias de cruzetas para sistemas fixos e rotativos.



Fonte: Amsted Maxion, [200-].

2.3.3 - Colar

O colar é um dispositivo colocado na cauda dos engates e hastes rígidas rotativas, de forma a auxiliar a rotação dos mesmos. Fica em contato direto entre a cruzeta rotativa e a cauda do engate (ALTOÉ, 2011). Este componente é visto na Figura 15.

Figura 15 – Fotografia de um colar.



Fonte: Amsted Maxion, [200-].

2.3.4 - Bolso do Conjunto de Choque e Tração e Espelho

Segundo Seid (2015), o bolso para acoplamento do conjunto de choque e tração é uma abertura na longarina central do vagão, destinada ao recebimento do espelho, do conjunto de choque e tração e dos batentes.

O espelho é uma peça de aço fundido, soldada nas vigas das cabeceiras de um vagão, utilizada para suportar o corpo do engate, sendo separada em apoio flexível, bolsa do apoio flexível, chaveta retentora e espelho, como mostrado na Figura 16 (VITÓRIA, 2006).

Figura 16 – Fotografia de um espelho.

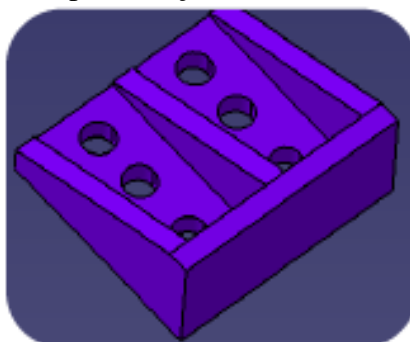


Fonte: Vitória, 2006.

2.3.5 - Batentes e Placa de Suporte

Os batentes são estruturas solidárias ao *Center Sill*, divididas em batentes superior e inferior. Os batentes inferiores são colocados como limites de profundidade do bolso do CCT e os superiores são geralmente ligados às estruturas colocadas nas extremidades dos bolsos, chamadas de espelhos (WABTEC, 2003). Na Figura 17 é possível ver um modelo de batente.

Figura 17 – Representação em CAD de um batente.



Fonte: Seid, 2015.

A placa de suporte é uma estrutura colocada na parte inferior da longarina central do vagão para suportar todo o peso do CCT e permitir o movimento livre da braçadeira enquanto a mesma move-se em conjunto com o movimento do veículo (SEID, 2015).

2.3.6 - Chave de Conexão

A chave de conexão é utilizada para unir o engate e a braçadeira através de seus respectivos furos, finalizando a ligação entre os mesmos. Para engates do tipo F, a ligação é feita através de um pino, mostrado na Figura 18, em verde (SEID, 2015).

Figura 18 – Representação esquemática em CAD de um pino de conexão no CCT.



Fonte: Acervo Vale.

2.4 - Aparelho de Choque e Tração

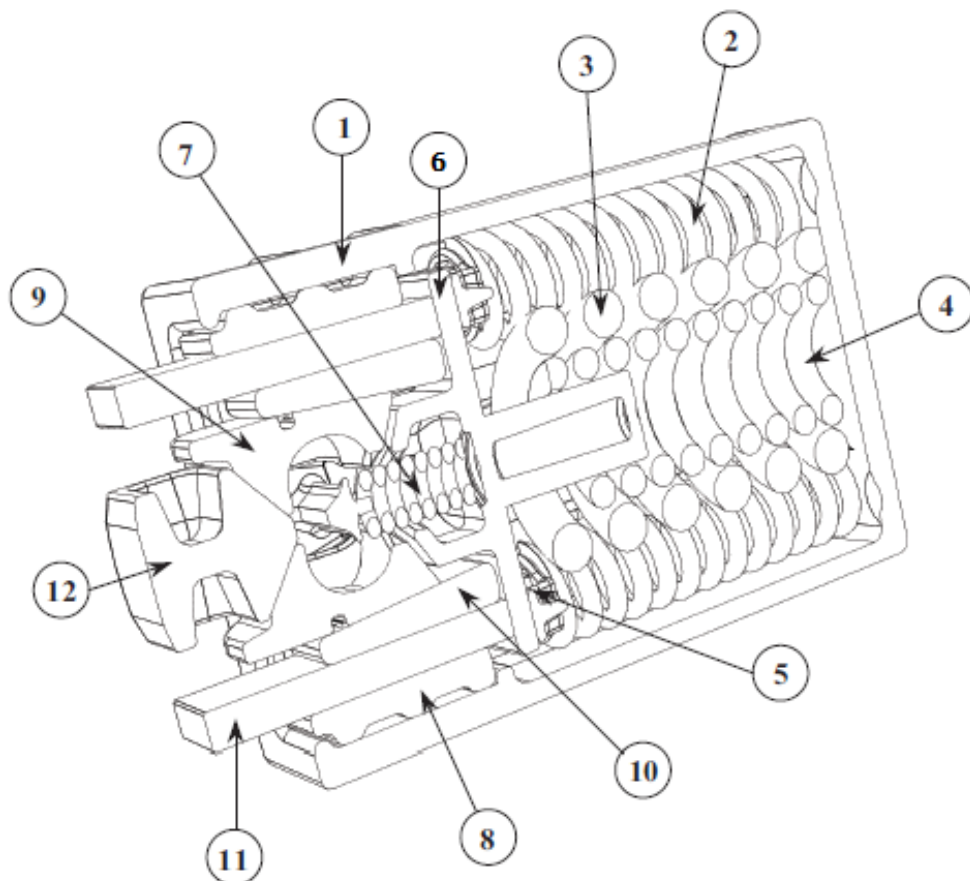
O Aparelho de Choque e Tração (ACT) é conhecido como o centro do conjunto de choque e tração, segundo Wabtec Corporation (2003), absorvendo a energia mecânica dos equipamentos de acoplamento, e ainda provê uma força de ricochete que mantém a folga entre os veículos ferroviários.

Segundo MRS (2008), é o componente responsável pela absorção dos choques provenientes da operação ferroviária, impedindo danos à estrutura dos vagões que podem gerar quebras e/ou acidentes. Esse aparelho tem como característica básica a absorção de energia por atrito de seus componentes internos, somados a características de molas, auxiliando neste processo e permitindo o retorno dos componentes à posição inicial.

O modelo Mark 50 é o modelo mais indicado para veículos ferroviários que operam com trens tipo, desenvolvidos para operações sob alta solicitação, ou seja, em condições severas (WABTEC CORPORATION, 2003).

O Mark 50 é composto dos seguintes sistemas, conforme a Figura 19.

Figura 19 – Esquemático do Aparelho de Choque e Tração Mark 50 em corte.



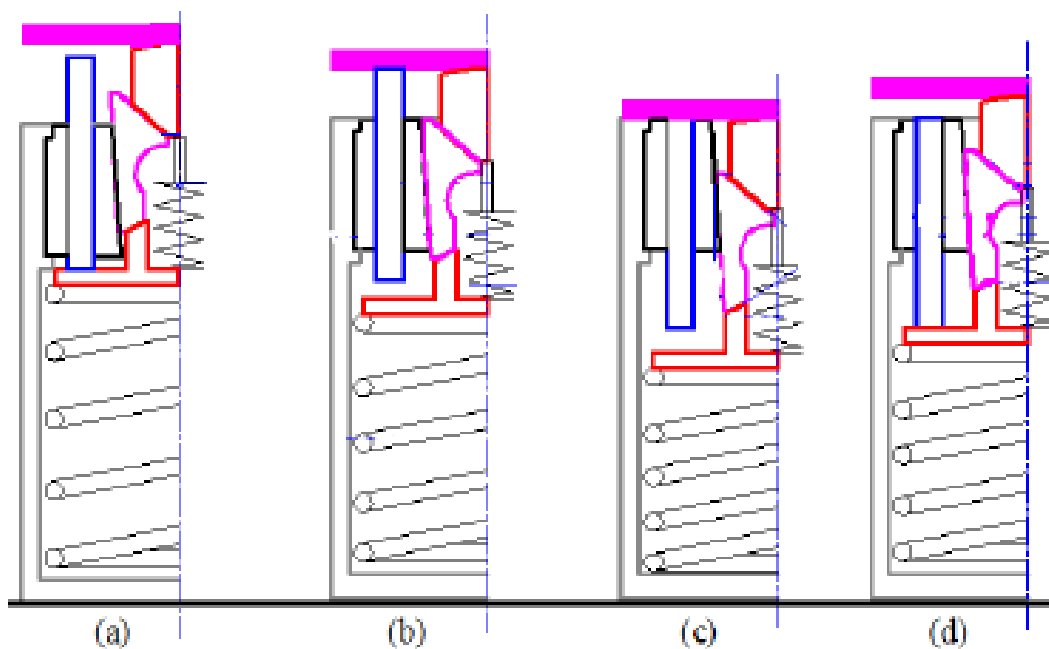
Fonte: Amsted Maxion, [200-].

- | | |
|-------------------------------|----------------------------------|
| (1) Carcaça; | (7) Mola de retorno; |
| (2) Mola de canto; | (8) Placa estacionária externa; |
| (3) Mola externa; | (9) Cunhas de Fricção; |
| (4) Mola interna; | (10) Placa estacionária interna; |
| (5) Assento da mola de canto; | (11) Chapa móvel; |
| (6) Assento das molas; | (12) Cunha central. |

Na Figura 20 é possível ver o trabalho do ACT durante a compressão e descompressão. O contato inicial para a compressão do Aparelho de Choque e tração é feito pela cruzeta na cunha central (Fig. 20 (a)). Esta peça transfere parte das solicitações para as cunhas de fricção, assento de molas e molas. Com o maior deslocamento da cunha central, a cruzeta entra em contato com a chapa móvel, aumentando a resistência por fricção (Fig. 20 (b)) (WU; SPIRYAGIN; COLE, 2014).

Após a compressão total do aparelho, mostrada na Figura 20 (c), inicia-se o processo de descompressão. Neste estágio o assento de molas toca a chapa móvel, sendo que ambos são empurrados pelas molas interna e externa (Fig. 20 (d)), e retornam para a posição inicial (WU; SPIRYAGIN; COLE, 2014).

Figura 20 – Representação esquemática da: (a) Compressão inicial; (b) Compressão parcial; (c) Compressão total e início da descompressão; (d) Descompressão parcial.



Fonte: Adaptado de Wu, Spiryagin e Cole (2014).

A função das molas interna, externa e do assento de molas de canto é amortecer os impactos e reconstituir o sistema. Já a cunha central recebe os esforços e os transmite as cunhas de fricção, que através do atrito sobre a placa interna estacionária, dissiparão a energia (AMSTED MAXION, [200-]).

A chapa móvel indica o desgaste interno do aparelho, atuando como elemento de atrito e ajudando na absorção da energia, sendo que ela deslizará entre as placas estacionárias externa e interna, sendo que a última estará exercendo os esforços normais provenientes das cunhas de fricção. A haste central fica em contato com a cunha central, forçando seu retorno à posição inicial (AMSTED MAXION, [200-]).

2.5 - Funcionamento do CCT

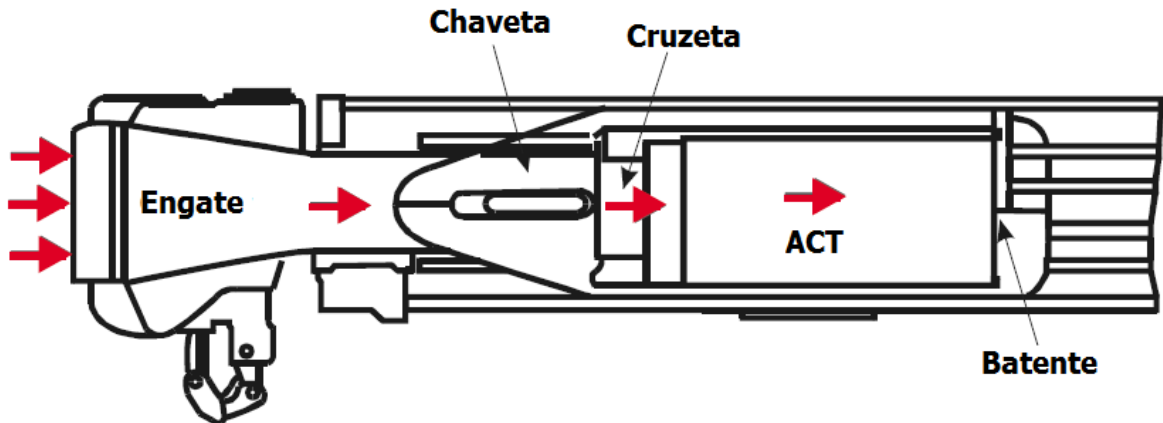
A forma na qual o conjunto de choque e tração foi desenvolvido faz com que ele sempre trabalhe em termos da compressão dos seus componentes, mesmo quando seu engate é tracionado ou comprimido, segundo Wabtec Corporation (2013), utilizando de forma completa e otimizada o conjunto.

2.5.1 - Compressão

Quando ocorre a compressão, uma força é gerada no engate, empurrando-o em direção ao *Center Sill*. Quando isto ocorre, a haste do engate entra em contato com a cruzeta, empurrando-a, e gerando o contato da mesma com a frente do aparelho de choque e tração. No lado contrário do aparelho estão localizados os batentes da longarina, que restringem o tamanho da bolsa e, conseqüentemente, do curso do ACT. Assim, a cruzeta comprime a frente do ACT e os batentes não permitem a sua movimentação, fazendo com que os componentes internos do aparelho se comprimam, agindo como absorvedores dos choques do movimento de compressão (WABTEC CORPORATION, 2003).

Na Figura 21 é possível ver este comportamento.

Figura 21 – Representação esquemática do comportamento de compressão do CCT.



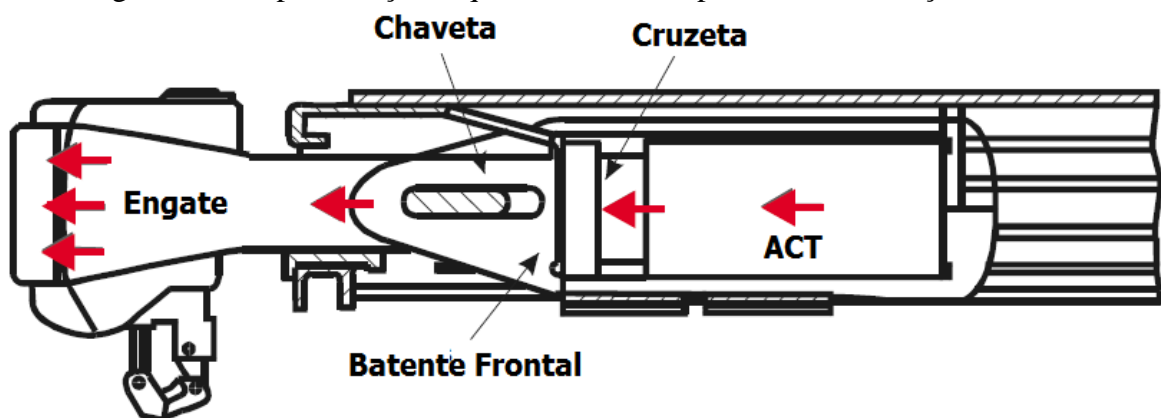
Fonte: Adaptado de Wabtec Corporation, 2003.

2.5.2 - Tração

Quando uma força de tração é gerada no engate, o CCT deve trabalhar como um absorvedor de impactos. Como o engate é preso à braçadeira por um pino, quando o engate é puxado, o pino puxa a braçadeira, gerando uma movimentação do ACT para a frente, sendo restringido pela cruzeta (que está encostada em batentes). Esse movimento faz com que o ACT seja novamente comprimido, agora contra a cruzeta (WABTEC CORPORATION, 2003).

Na Figura 22 é possível ver este comportamento.

Figura 22 – Representação esquemática do comportamento de tração do CCT.

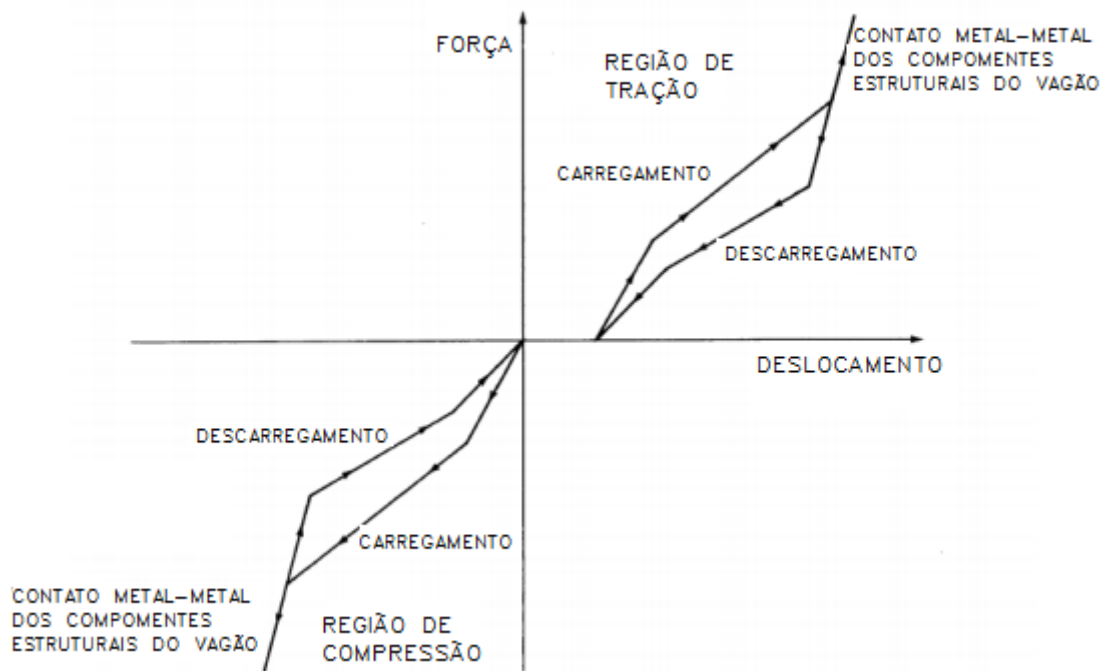


Fonte: Adaptado de Wabtec Corporation, 2003.

A junção das componentes elásticas (molas) e de fricção (cunhas) e das componentes não lineares, que são dadas pelas folgas, fazem com que o ACT apresente um comportamento diferenciado durante o trabalho (COLE, 2006).

Essas variáveis podem ser vistas através do gráfico de força em relação ao deslocamento, modeladas através de segmentos lineares, representando o comportamento histerético da cunha de ficção do ACT. O deslocamento também pode ocorrer sem gerar em forças, representando o momento onde existe atuação das folgas do Conjunto de Choque e Tração. (GARG & DUKKIPATI, 1984). Este comportamento pode ser visto no Gráfico 3, obtido através de um teste de impacto.

Gráfico 3 – Curva característica de um Conjunto de Choque e Tração genérico.



Fonte: Adaptado de GARG & DUKKIPATI, 1984.

3 - FOLGAS NO CONJUNTO DE CHOQUE E TRAÇÃO

Neste capítulo serão tratadas as principais folgas nos Conjuntos de Choque e Tração (CCTs), que vem a influenciar a operação e manutenção dos componentes, conhecidas como Folga Livre e Curso do Aparelho de Choque e Tração (ACT). Para isto, serão avaliadas as versões de folgas discutidas pela Association of American Railroads (AAR), Companhia Vale S.A. e Federal Railroad Administration (FRA).

3.1 - Folga Livre

De acordo com a AAR (2007), quando os veículos ferroviários estão nos trilhos de pátios e/ou oficinas, deve-se examinar e substituir as partes defeituosas dos CCTs ao alcance, como engates, seus suportes e fixadores. Essa inspeção inicial não necessita a retirada do ACT, exceto quando algum componente for encontrado com defeito ou se a folga livre for maior que 1’’ (uma polegada).

A folga livre, ainda de acordo com a AAR (2007, p. 235), pode ser definida como: “a distância entre o espelho e a traseira da cabeça do engate” medida da seguinte maneira:

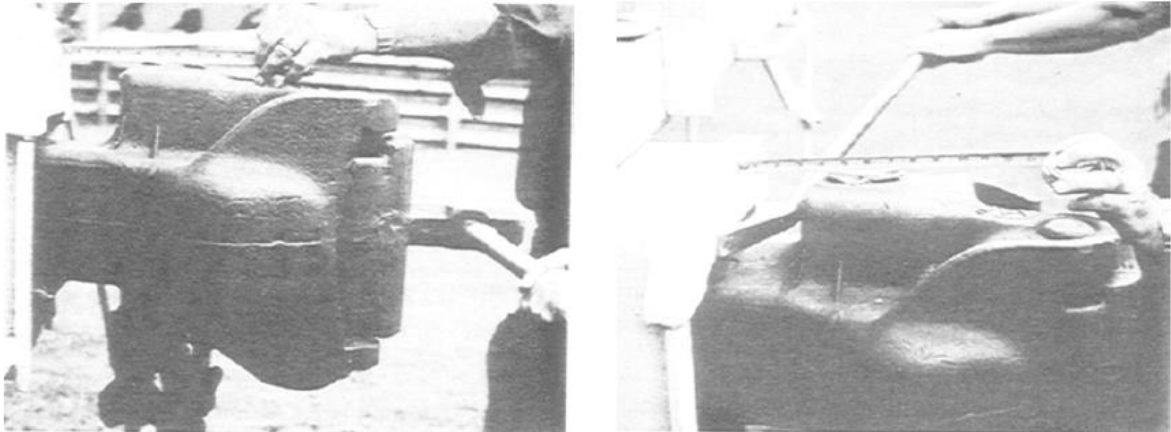
A medida de folga livre pode ser determinada primeiramente martelando o engate para a posição sólida e medindo a distância entre a traseira da cabeça do engate e o espelho. Após, inserir uma longa barra entre a traseira do engate e o espelho e encolher o engate ao máximo, e novamente medir o espaço entre a traseira do engate e o espelho. A diferença entre estas duas medidas é a quantidade de folga livre presente. A folga livre máxima permitida no conjunto de choque e tração é de 1’’. (AAR, 2007, p. 235).

Assim, é possível escrever que:

$$F_L \leq 1'' = 25,4 \text{ mm} \quad \text{Eq. 1}$$

O procedimento adotado descrito anteriormente pode ser visto na Figura 23.

Figura 23 – Fotografia do procedimento para obtenção da Folga Livre.

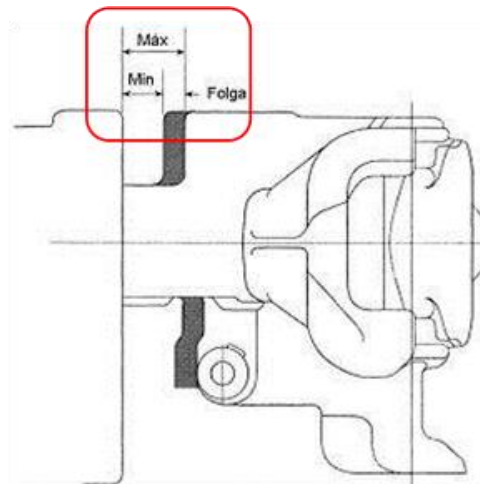


Fonte: AAR, 2007.

O excesso de folga pode indicar que o ACT está preso, o que pode causar um acidente no operador da manutenção, assim como uma falha na braçadeira, pino de conexão, conexão entre engate e braçadeira e ACT. Todas as folgas maiores que 1” devem ser preferencialmente eliminadas ou reduzidas (AAR, 2007).

A folga livre também é citada por Altoé et al. (2011), que segue o mesmo padrão de medição que a referência da AAR. Para melhor entendimento das folgas, as mesmas são nomeadas como mínima e máxima. A folga mínima é no estágio quando o engate encontra-se o mais próximo do espelho, na posição sólida, já a folga máxima quando o mesmo encontra-se no ponto mais afastado. A diferença entre as duas medidas, mínima e máxima, é conhecida como folga livre ou folga longitudinal. Na Figura 24 podemos ver uma representação esquemática dos conceitos de folgas máxima, mínima e Folga Livre, para uma visualização lateral do engate.

Figura 24 – Representação esquemática das medidas das Folgas máxima, mínima e Folga Livre.



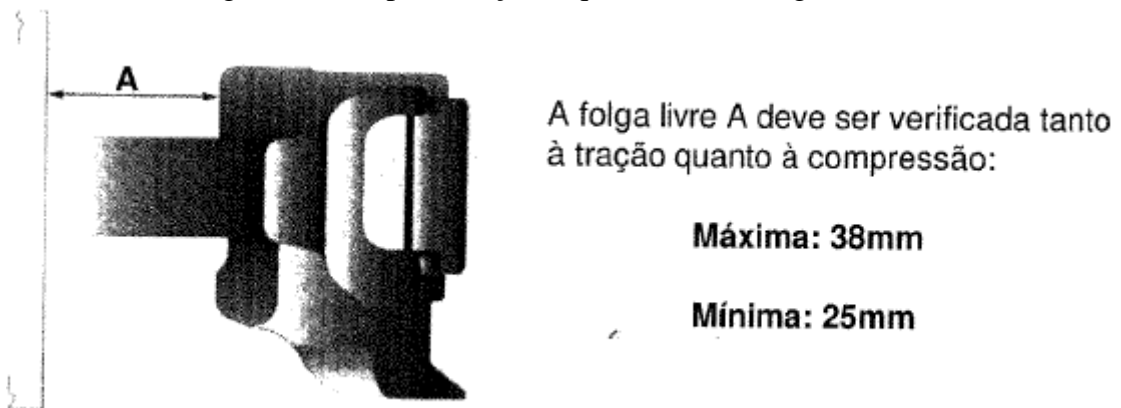
Fonte: Altoé et al., 2011.

Assim, é possível constatar que a folga livre pode ser descrita como:

$$F_L = F_{m\acute{a}x} - F_{m\acute{i}n} \quad \text{Eq. 2}$$

Já para Rosa (2007), a medida da folga livre deve ser determinada para duas situações distintas: tração e compressão. Durante a tração, a folga livre A, pode possuir um valor máximo de 38 milímetros (38 mm), correspondentes a 1,5 polegadas (1,5”). Já durante a compressão, a folga livre A poderá ser no máximo 25 milímetros (25 mm), correspondentes a 1 polegada (1”). Esta medida é chamada de folga A, mostrada na Figura 25.

Figura 25 – Representação esquemática da Folga Livre A.

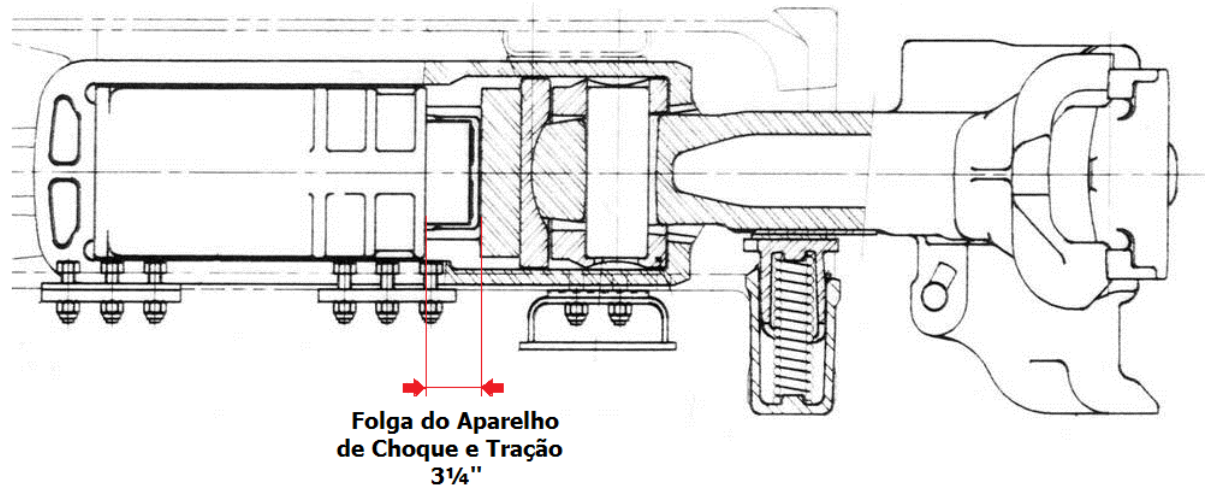


Fonte: Rosa, 2007.

3.2 - Curso do Aparelho de Choque e Tração

Segundo AAR (2007) e Altoé (2011) o Aparelho de Choque e Tração Mark 50 possui uma folga conhecida como folga de curso de 3 ¼ polegadas (3 ¼”), correspondentes a 85,55 milímetros (85,55 mm). Esta folga é a somatória de todas as folgas dos componentes internos do aparelho de choque e tração e entre a cruzeta e a cruzeta lisa. Esta folga pode ser vista na Figura 26, em um ACT.

Figura 26 – Representação esquemática do curso de trabalho do ACT.



Fonte: Adaptado de AAR (2007).

3.3 - Folga Total

A Folga Total do CCT pode ser descrita como o somatório das Folgas Livre e do curso de trabalho do ACT, segundo AAR (2007).

$$F_T = F_L + F_{ACT} \quad \text{Eq. 3}$$

Portanto,

$$F_T = 1'' + 3 \frac{1}{4}'' \quad \text{Eq. 4}$$

$$F_T = 4 \frac{1}{4}'' = 107,95 \text{ mm} \quad \text{Eq. 5}$$

De acordo com um relatório da FRA (2004), a Folga Total é representada pelo curso longitudinal de um CCT, relativo ao vagão que está acoplado. Este curso total pode chegar a um valor total de 6 polegadas (6''), dependendo da força aplicada no engate e a taxa de aplicação desta força. Desta forma, a conexão entre dois vagões pode contribuir para uma Folga Total de 12 polegadas (12''), sendo esta folga proporcional ao comprimento do trem, como mostrado na Tabela 1.

Tabela 1 – Aumento da Folga Total proporcional ao aumento do trem.

Comprimento do Trem	Folga Total
50 vagões	50 pés
100 vagões	100 pés
150 vagões	150 pés
200 vagões	200 pés

Fonte: Adaptado de FRA, 2004.

Conforme FRA (2004), podemos inferir que o distanciamento máximo entre vagões é de 1 pé (1'), equivalente a 12 polegadas (12"), e a Folga Total, para cada engate é:

$$F_T = 6'' = 152,4 \text{ mm} \quad \text{Eq. 6}$$

A diferença entre estas duas referências pode ser descrita abaixo:

$$\Delta F = 1 \frac{3}{4}'' = 44,45 \text{ mm} \quad \text{Eq. 7}$$

Essa medida pode ser avaliada como a folga entre as mandíbulas do engate, sendo pouco citada e com uma grande influência, representando 29% do valor de Folga Total citada por FRA (2004).

Como existe a divergência entre normas e fontes de pesquisa, a Vale S.A; detentora da Estrada de Ferro Vitória a Minas (EFVM), por determinação do grupo da Engenharia da empresa, opera com os valores de folga descritos pela AAR, pois a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) não contempla nenhuma atribuição para este quesito. O presente trabalho seguirá a metodologia adotada pela Vale S.A.

4 - RELAÇÃO ENTRE FOLGAS E CHOQUES EM COMPOSIÇÕES

Neste capítulo será abordado o fator gerador da relação entre as folgas e os choques de tração e compressão nos trens, assim como as consequências destes para todo o trem e sua estrutura.

4.1 - Dinâmica Longitudinal do Trem

A dinâmica é o estudo do movimento acelerado de um corpo, que pode ser dividido em cinemática, que trata somente dos aspectos geométricos do movimento, e da cinética, que é a análise das forças que causam o movimento (HIBBELER, 2011).

A dinâmica longitudinal pode ser definida como:

A dinâmica longitudinal do trem é definida como os movimentos dos veículos ferroviários na direção do trilho. Ela então inclui o movimento do trem como um todo e quaisquer movimentos entre veículos, permitidos graças às folgas das conexões entre os vagões. (COLE, 2006).

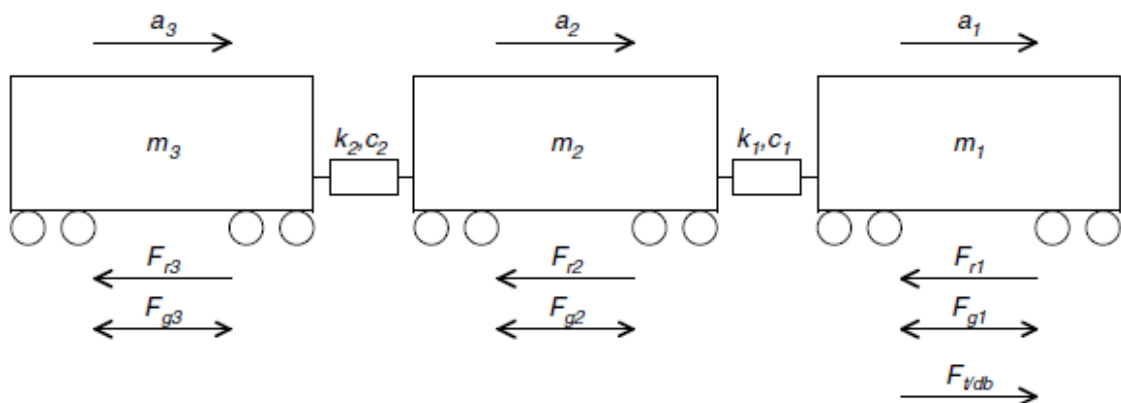
A dinâmica longitudinal do trem e a estabilidade das composições possuem uma alta correlação, sendo que, no momento que os comboios se tornam maiores e mais pesados, maiores as forças entre veículos. Com este aumento, as componentes laterais e verticais destas forças também sofrem um acréscimo, afetando a estabilidade das composições. Devido a estas condições, a gestão energética dos trens tem sua parcela, propondo que a operação de trens de trens maiores leva a consequências energéticas para a parada dos mesmos mais significante (COLE, 2006. p. 241).

Segundo Cole (2006), o comportamento longitudinal dos trens é uma função das entradas de controle provenientes da locomotiva, entradas dos freios, topografia dos trilhos, curvatura dos trilhos, características dos veículos e dos truques e características das conexões entre vagões e pode ser descrita através de um sistema de equações diferenciais. Para termos de modelagem e simulação dos modelos ferroviários, assume-se que não atuam forças laterais e verticais nos veículos.

Essas equações podem ser desenvolvidas através da generalização de um sistema de 3 massas, onde podem ser consideradas uma locomotiva (mostrada como m_1), um vagão intermediário (m_2) e um para a cauda (m_3). Todos os veículos são sujeitos à retardação e forças de provenientes do perfil (rampa). As forças de tração e frenagem dinâmica são incluídas nos veículos motrizes (COLE, 2006. p. 242).

Este modelamento pode ser visto na Figura 27.

Figura 27 – Representação esquemática do modelo de trem de três massas.



Fonte: Cole, 2006.

Na Figura 27 é possível perceber que as forças de provenientes do perfil (rampa), F_g , podem ser em ambas as direções. A soma das forças de retardação, F_r , é composta das resistências de rolamento, resistência de curva, resistência do ar e de frenagem (excluindo a frenagem dinâmica que é melhor agrupada com a força motriz da locomotiva, F_{vdb}). As resistências do ar e de rolamento são agrupadas como um termo denominado de resistência de propulsão, F_{pr} , fazendo com que a equação de F_r torne-se (COLE, 2006. p. 242):

$$F_r = F_{pr} + F_{cr} + F_b \quad \text{Eq. 8}$$

Em que F_{cr} é a resistência de curvatura e F_b é a resistência de frenagem.

O sistema de três massas de um trem permite o desenvolvimento de três diferentes equações diferenciais, definidas para cada veículo da Figura 27, considerando-se um modelo linear de conexão dos vagões (COLE, 2006. p. 242).

$$m_1 a_1 + c_1(v_1 - v_2) + k_1(x_1 - x_2) = F_{t/db} - F_{r1} - F_{g1} \quad \text{Eq. 9}$$

$$m_2 a_2 + c_1(v_2 - v_1) + c_2(v_2 - v_3) + k_1(x_2 - x_1) + k_2(x_2 - x_3) = -F_{r2} - F_{g2} \quad \text{Eq. 10}$$

$$m_3 a_3 + c_2(v_3 - v_2) + k_2(x_3 - x_2) = -F_{r3} - F_{g3} \quad \text{Eq. 11}$$

Em que a é a aceleração de cada veículo, c é a constante de amortecimento do acoplamento, k a constante de rigidez elástica do acoplamento, v é a velocidade dos veículos e x a distância.

É importante ressaltar que o valor positivo de F_g é tomado como um índice superior, ou seja, uma força de retardamento.

De acordo com Cole (2016), para permitir que as locomotivas possam ser posicionadas em qualquer posição, para uma composição com qualquer número de vagões, ela deve ser escrita de forma geral, dada por:

Para a locomotiva (carro líder):

$$m_1 a_1 + c_1(v_1 - v_2) + k_1(x_1 - x_2) = F_{t/db} - F_{r1} - F_{g1} \quad \text{Eq. 12}$$

Para o veículo i (vagão intermediário):

$$m_i a_i + c_{i-1}(v_i - v_{i-1}) + c_i(v_i - v_{i+1}) + k_{i-1}(x_i - x_{i-1}) + k_i(x_i - x_{i+1}) = F_{t/dbi} - F_{ri} - F_{gi} \quad \text{Eq. 13}$$

Para o n -ésimo veículo (último carro):

$$m_n a_n + c_{n-1}(v_n - v_{n-1}) + k_{n-1}(x_n - x_{n-1}) = F_{t/dbn} - F_{rn} - F_{gn} \quad \text{Eq. 14}$$

Em que o subscrito n e $n-1$ nas grandezas significa o n -ésimo e $(n-1)$ -ésimo veículos.

A inclusão do termo $F_{t/db}$ em cada equação, significando em cada veículo, faz com que as equações possam ser aplicadas a qualquer sistema de distribuição de energia, com locomotivas também ao longo da composição. Para vagões, ou seja, veículos desprovidos de tração, a componente $F_{t/db}$ deve ser considerada nula (COLE, 2006).

Para modelamentos não lineares do sistema, as constantes de amortecimento e rigidez elástica são substituídas por funções, onde é comum expressar a última como uma função de deslocamento e incorporar a folga do engate e a resposta do ACT em forma de uma aproximação linear. Já o amortecimento é geralmente expressado em função da velocidade. Funções mais complexas, incorporando uma segunda variável independente, como

deslocamento e velocidade para funções de rigidez elástica, também podem ser utilizadas. As equações não lineares generalizadas são, de acordo com Cole (2006. p. 243):

Para a locomotiva (carro líder):

$$m_1 a_1 + f_{wc}(v_1, v_2, x_1, x_2) = F_{t/db} - F_{r1} - F_{g1} \quad \text{Eq. 15}$$

Para o veículo i-ésimo (vagão intermediário):

$$m_i a_i + f_{wc}(v_i, v_{i-1}, x_i, x_{i-1}) + f_{wc}(v_i, v_{i+1}, x_i, x_{i+1}) = F_{t/dbi} - F_{ri} - F_{gi} \quad \text{Eq. 16}$$

Para o n-ésimo veículo (último carro):

$$m_n a_n + f_{wc}(v_n, v_{n-1}, x_n, x_{n-1}) = F_{t/dbn} - F_{rn} - F_{gn} \quad \text{Eq. 17}$$

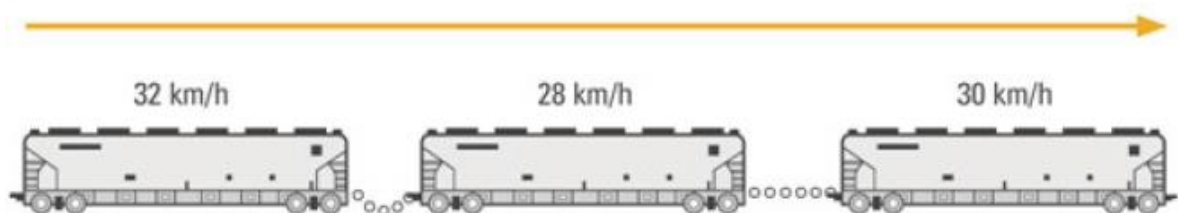
Onde f_{wc} é a função não linear que descreve todas as características da conexão entre os vagões (COLE, 2006).

A solução destas equações é feita de maneira complicada, precisando ser calculada as forças de entrada do sistema, como $F_{t/db}$, F_r , e F_g . A tração e frenagem dinâmica devem ser constantemente atualizadas para o ajuste da condução e quaisquer mudanças de velocidade dos veículos. As forças de retardo, F_r , são dependentes das configurações do sistema de frenagem, velocidade, curvatura e projeto do material rodante. As componentes da força provenientes do perfil, F_g , dependem das angulações das rampas e da consequente posição do veículo na mesma (COLE, 2006). Para o cálculo de todos estes fatores, foi utilizado um simulador ferroviário, em destaque no próximo capítulo.

4.2 - Diferencial de Velocidades

Segundo Magalhães (2004), o fator que interliga os conceitos de folgas e os choques em composições durante sua operação é o diferencial de velocidades, descrito como a variação instantânea de velocidade de cada vagão devido às folgas do CCT, mostrada na Figura 28.

Figura 28 – Representação esquemática do diferencial de velocidades.



Fonte: Leite et al, 2011.

Verifica-se na Figura 28 três veículos com diferentes valores de velocidade instantânea, com variância de 4 km/h.

Este diferencial, também conhecido como Velocidade Relativa entre Carros, é gerado por mudanças no traçado (rampa e curvatura da via), mudanças na posição do acelerador das locomotivas e mudanças na aplicação de freios do trem, tendo como efeito grandes forças de compressão e tração, também explicados na citação a seguir (MAGALHÃES, 2004).

Impactos mais severos, via de regra, são provocados por brusco ajuste de folgas (*Slack Action*), devido ao rápido acúmulo de forças retardadoras. Isto ocorre normalmente por frenagem dinâmica ou independente enquanto o trem ainda se encontra esticado ou em posição neutra. O fechamento das folgas acontece progressivamente, ao longo do trem, e os aparelhos de choque podem, em algum ponto, atingir seu fim de curso sem conseguir dissipar todo o diferencial de velocidade e energia entre veículos. (MAGALHÃES, 2004 apud THE AIR BRAKE ASSOCIATION [19--?]).

Os choques devem ser absorvidos tanto pela via permanente, quanto pela estrutura dos vagões e sua carga. Os diferenciais de velocidade responsáveis por esse fenômeno geralmente são menores que 0,32 km/h, mas o aparelho de choque e tração utilizado nos vagões pode absorver diferenciais de até 6,4 km/h. Acima deste valor, danos ao vagão, via permanente ou os dois podem ser gerados (FRA, 2002).

O efeito dos choques de tração e compressão em relação à velocidade pode ser visto na Tabela 2.

Tabela 2 – Relação entre diferencial de velocidade e impacto.

Diferencial de Velocidade	Efeito do Choque
4,83 km/h	4 vezes maior que em 1,6 km/h
8,05 km/h	25 vezes maior que em 1,6 km/h
16,1 km/h	100 vezes maior que em 1,6 km/h

Fonte: Adaptado de FRA, 2002.

O efeito do choque pode ser calculado através de conceitos básicos da dinâmica, onde a variação de energia do sistema é dada por (HIBBELER, 2011).

$$\Delta_{EC} = \frac{P(\vartheta_1^2 - \vartheta_2^2)}{2g} \quad \text{Eq. 18}$$

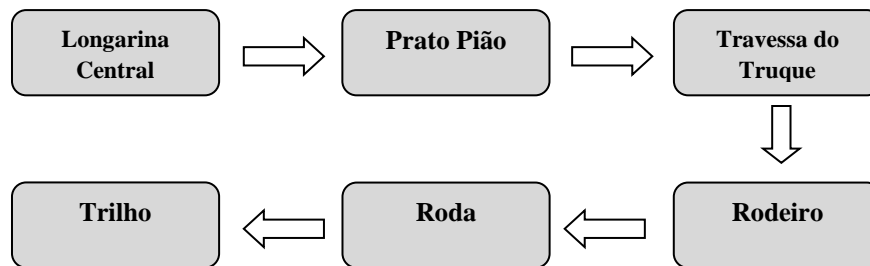
E a força de impacto gerada, F_i , é dada por:

$$F_i = \frac{\Delta_{EC}}{d} \quad \text{Eq. 19}$$

Em que F_i varia com a distância de dissipação de energia, ou seja, o Curso do Aparelho de Choque e Tração que é construído para tal função (MAGALHÃES, 2004).

Conforme Magalhães (2004), quando um vagão recebe um choque com diferencial acima de 6 km/h, ele o transmite do Aparelho de Choque e Tração as seguintes estruturas, segundo a Figura 29, em forma de onda.

Figura 29 – Representação das estruturas de distribuição dos impactos.



Fonte: Adaptado de Magalhães, 2004.

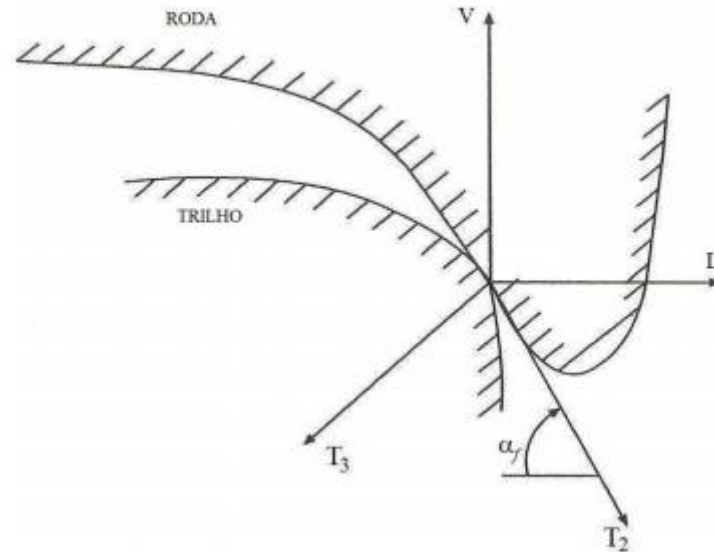
4.3 - Relação com as Forças Laterais e Verticais

Um estudo em simuladores da empresa MRS mostrou que a onda de impacto que chega até os trilhos pode corresponder a uma parcela de 30% da força inicial aplicada, podendo afetar de maneira incisiva a relação das forças laterais pelas forças verticais do vagão. Isto pode gerar descarrilamentos e ocorrências ferroviárias de grandes magnitudes (MAGALHÃES, 2004).

A mecânica do descarrilamento é uma variável crítica na segurança operacional do transporte ferroviário, indicando a estabilidade da composição. Segundo Dukkipati (2000), ela é determinada pela interação de efeitos não lineares, incluindo a variação na localização dos pontos de contato roda-trilho, ângulos de contato, geometria da zona de contato e forças devido ao escorregamento.

A fórmula de Nadal, que descreve a relação entre a força lateral e vertical, mostra um guia para o descarrilamento, de acordo com o tipo de contato roda-trilho. A razão de descarrilamento (L/V) é usada como medida de segurança de marcha de veículos. A seguir será demonstrada a Fórmula de Nadal (DUKKIPATI, 2000). Considere as forças lateral (L) e vertical (V) atuando no flange de contato de uma roda e trilho, como mostrado na Figura 30.

Figura 30 – Representação esquemática do contato roda-trilho.



Fonte: Dukkupati, 2000.

Em que T_2 e T_3 são as forças de contato no plano normal à área de contato, respectivamente, α_f o ângulo de flange e μ o coeficiente de atrito. Podemos então escrever que:

$$L = T_2 \cos(\alpha_f) - T_3 \sin(\alpha_f) \quad \text{Eq. 20}$$

$$-V = T_2 \sin(\alpha_f) + T_3 \cos(\alpha_f) \quad \text{Eq. 21}$$

Considerando $T_2 = \mu T_3$, é possível escrever uma relação de L/V igual à:

$$L/V = \frac{\tan(\alpha_f) - \mu}{1 - \mu \tan(\alpha_f)} \quad \text{Eq. 22}$$

De acordo com Ehrenbeck e Polcari (1984), os fenômenos de descarrilamento são extremamente complexos de medir e, baseado na verificação dos mecanismos do sistema trem-via, foram identificados os seguintes modos de descarrilamento:

- i) Escalada da roda;
- ii) Levantamento da roda;

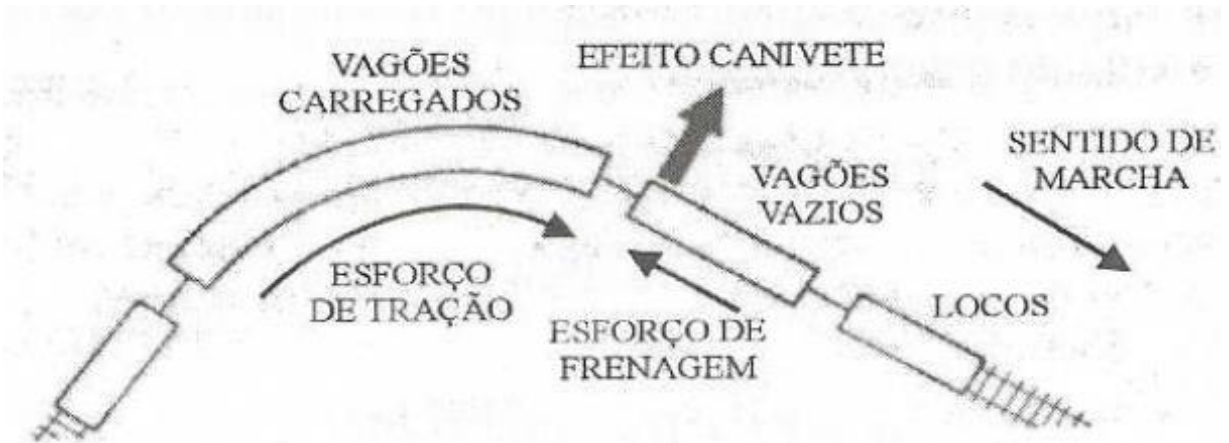
- iii) Deflexão do trilho;
- iv) Separação caixa-truque;
- v) Falha repentina nos componentes.

Conforme Branco (2002), os esforços nos engates têm grande importância na questão do descarrilamento, sendo que a formação e condução dos trens devem ser muito bem estudadas pelas operadoras ferroviárias, sendo que esses esforços podem ocasionar o aumento das forças laterais, excedendo os limites de L/V .

Dois efeitos que geram descarrilamentos são ligados aos engates, conhecidos como efeito canivete e efeito de corda. A diferença de velocidades entre os vagões, gerada por uma curva ou Aparelho de Mudança de Via (AMV), somada a uma alta taxa de frenagem ou tração, faz com que um grande choque seja gerado, forçando a roda a subir no boleto do trilho e gerar um descarrilamento (BRANCO, 2002).

Dois exemplos do comportamento canivete podem ser vistos respectivamente, nas Figuras 31 e 32.

Figura 31 – Representação esquemática da alta taxa de frenagem pneumática ou dinâmica em curva.



Fonte: Branco, 2002.

Figura 32 – Representação esquemática de uma locomotiva de auxílio empurrando vagões leves contra vagões pesados.



Fonte: Branco, 2002.

Na Figura 31 e 32 vemos como uma curva e uma rampa podem gerar o efeito canivete em uma composição, respectivamente. A diferença de velocidades gerada pela diferença de peso entre os vagões vazios e carregados faz com que um choque seja ocasionado na saída da curva, comprimindo os engates na Figura 31. Já na Figura 32 é possível perceber este efeito em decorrência da compressão dos vagões vazios entre os vagões carregados e as locomotivas, que possuem massas muito maiores que as dos vagões.

A tração dos engates é diretamente relacionada ao efeito corda, onde:

Os veículos são forçados contra o trilho interno em curvas, possibilitando o tombamento ou o afastamento lateral deste último (baixa resistência lateral da via), ou mesmo a subida da roda sobre o boleto do referido trilho, com o trecho da composição usualmente adquirindo um formato retilíneo (externamente ou internamente ao trilho interno), semelhante ao de uma corda esticada. (BRANCO, 2002. p. 320).

Já a compressão dos engates propicia o efeito canivete, definido como:

Os veículos são forçados contra o trilho externo nas curvas, podendo as rodas ultrapassar o boleto, provocar o tombamento do trilho ou seu afastamento lateral (caso a resistência lateral seja baixa). (BRANCO, 2002. p. 320).

Mesmo considerando toda a influência das folgas nos choques da composição e na dinâmica ferroviária, Brina (1982) cita:

Sabemos que os golpes exagerados são inconvenientes devidos aos choques que podem ocasionar entre os veículos, durante a marcha. Não é possível, entretanto, eliminar totalmente as folgas, pois, para trens muito pesados, se não existissem as folgas entre os engates, o esforço inicial para pôr em movimento seria enorme, para vencer a inercia. Havendo folga, o esforço é transmitido de veículo a veículo, enquanto a locomotiva avança, na partida do trem. (BRINA, 1982, p. 160).

Singh (1960) também cita a vantagem operacional das folgas livres para a dinâmica longitudinal, facilitando a partida do trem, sendo que somente um vagão é movido por vez. Porém, esta movimentação sucessiva de vagões produz uma oscilação no sistema de molas do ACT. Com a folga livre e características desfavoráveis nas molas do ACT, uma ressonância desfavorável pode ocorrer nas molas principais do aparelho (molas interna e externa). Foi comprovada que o acoplamento de vagões com o uso engates da AAR e hastes rígidas geram duas à três vezes o valor nominal da força gerada pelas locomotivas nos CCTs próximos a elas.

A partir das citações de Brina (1982) e Singh (1960) é importante lembrar que o presente trabalho não tem como objetivo retirar todas as folgas dos CCTs, pois o modelo de composições utilizado necessita destas folgas para garantir a estabilidade do trem. O objetivo é entender o quanto o aumento destas folgas pode ser prejudicial para a integridade dos componentes e para a segurança operacional. Este estudo será visto e tratado no capítulo seguinte, com uma abordagem que envolve a simulação da dinâmica longitudinal, aplicada às Folgas Livres dos CCTs.

5 - ESTUDO DA INFLUÊNCIA DAS FOLGAS NA DINÂMICA LONGITUDINAL

Neste capítulo serão apresentados os procedimentos metodológicos para as medições das folgas encontradas em serviço na EFVM, bem como para as simulações com o simulador ALION. Para a obtenção dos dados sobre a relação entre as folgas do CCT e os valores de impacto, que geram efeitos nocivos à dinâmica ferroviária, serão abordadas as simulações e suas considerações.

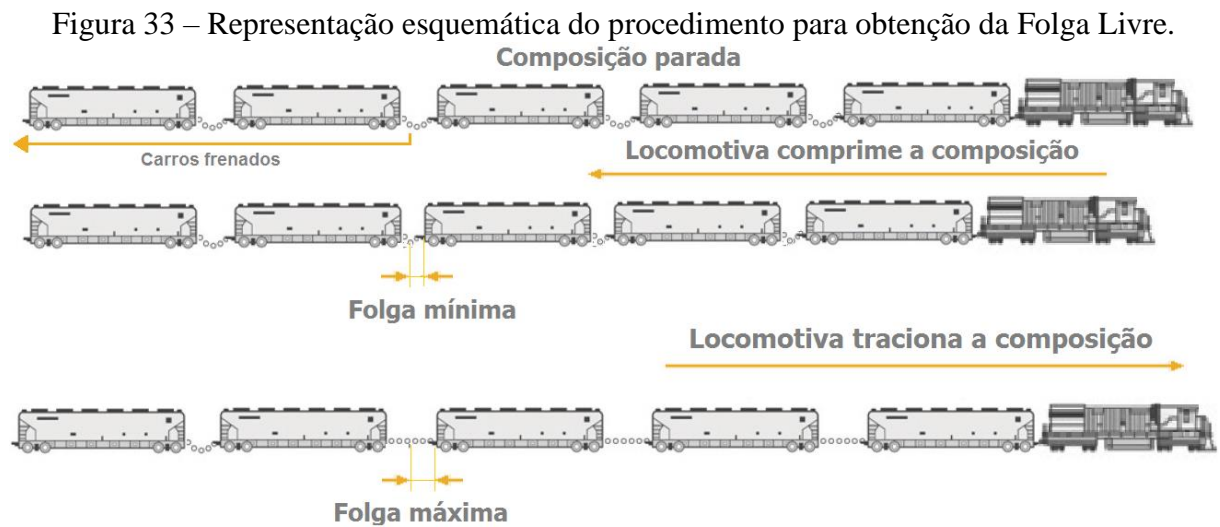
5.1 - Metodologia empregada para medição da Folga Livre

Para a obtenção da Folga Livre foi utilizado um procedimento realizado diretamente em um conjunto de vagões, com o auxílio de um veículo trator. A partir de um determinado número de vagões contados a partir do veículo trator, os freios do conjunto de vagões são restringidos, liberando somente os primeiros. A composição então é comprimida pelo veículo, suficientemente para encostar as folgas, e freada para obtenção da primeira medida, de folga mínima, medida através de uma trena. Posteriormente o veículo trator traciona o grupo de vagões restringidos, levando os engates a posição de folga máxima, para outra aferição de medidas, também através do uso de trena. A diferença entre estas duas medidas é a Folga Livre (ANDRADE ET AL., 2016).

Esse procedimento foi efetuado de duas formas, com dois veículos tratores diferentes, uma locomotiva e um Locotrator (TK), trator utilizado para puxar vagões na Oficina de Vagões, mostrados a seguir.

5.1.1 - Medição com uso de Locomotiva

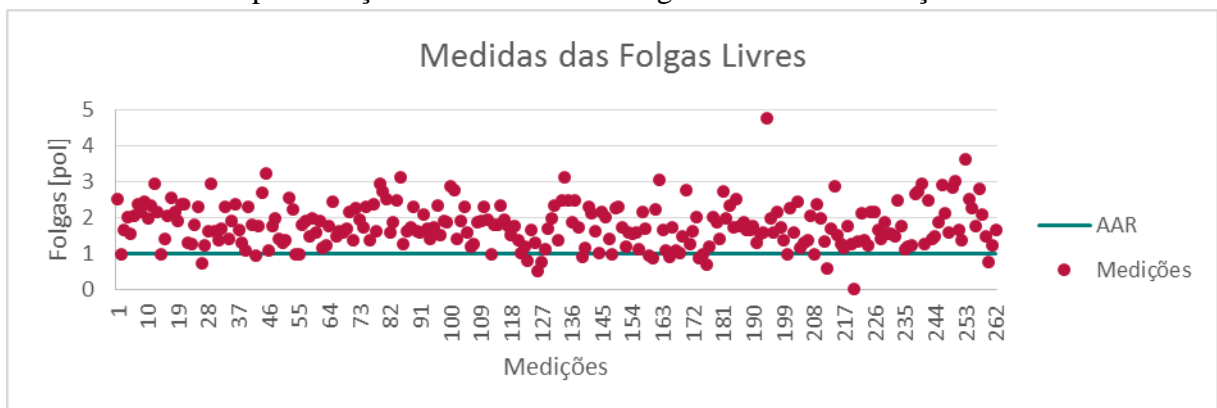
O procedimento descrito foi realizado em duas oportunidades, contando com uma locomotiva GE Dash 9 de 4000hp e um lote de 84 vagões GDE, utilizando, no máximo, 4 pontos de aceleração no veículo trator. Na primeira oportunidade, foram restringidos 20 vagões, e na segunda 22 vagões. O procedimento de Andrade et al (2016) encontra-se representado esquematicamente na Figura 33.



Fonte: Andrade et al, 2016.

A distribuição de valores de Folga Livre é demonstrada no Gráfico 4 e a estatística na Tabela 3, onde uma medição por CCT foi realizada.

Gráfico 4 – Representação das medidas de Folga Livre com utilização de locomotiva.



Fonte: Autoria própria, 2017.

Tabela 3 – Valores das medidas de Folga Livre com utilização de locomotiva.

Número de medições	262
Média	1,78 pol = 45,25 mm
Desvio padrão	0,61 pol = 15,44 mm
Maior valor	4,76 pol = 121,00 mm
Menor valor	0 pol = 0 mm
Segundo menor valor	0,51 pol = 13,00 mm

Fonte: Autoria própria, 2017.

Para este método, a locomotiva exerceu um esforço trator de 38.000 kgf para comprimir e esticar os vagões. Como a amostragem medida contava com uma amostragem bem heterogênea, com manutenções dentro e fora das datas estipuladas, não é possível constatar que os valores medidos são exclusivos de Folga Livre. Este fator também é percebido na média da amostragem, que está com o valor muito acima do referenciado pela AAR. Por esta razão, uma nova medição foi efetuada.

5.1.2 - Medição com o uso de Locotrator

O procedimento de Andrade et al. (2016) foi utilizado para as medições na Oficina de Vagões, com o uso de um Locotrator, que possui um esforço trator máximo de 9.000 kgf e possui o diferencial de movimentar-se em trilhos e em estrada, sendo utilizado na oficina para movimentar 4 duplas de vagões, no máximo, devido a seu baixo esforço trator (ANDRADE, 2015). Este equipamento é demonstrado na Figura 34.

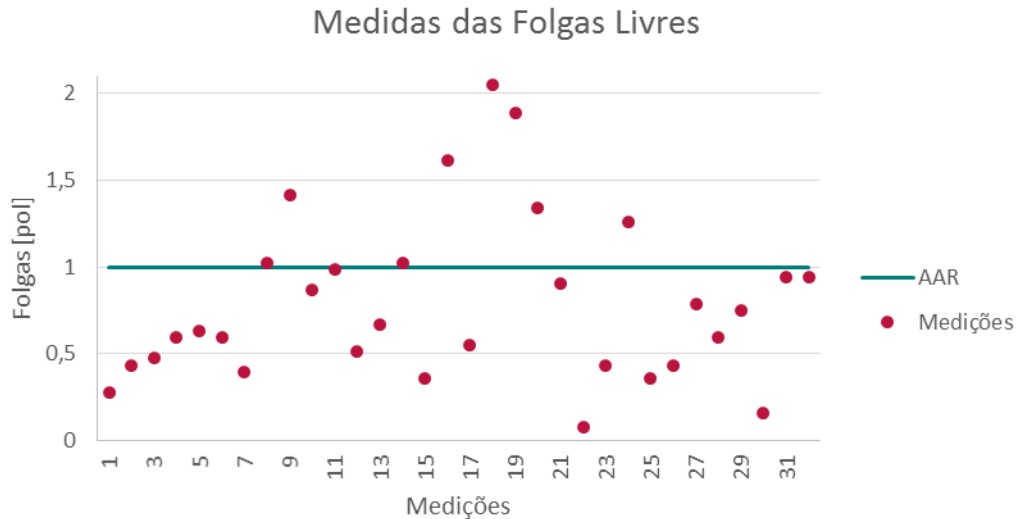
Figura 34 – Fotografia de um Locotrator.



Fonte: Andrade, 2015.

A distribuição de valores de Folga Livre para esta medição é demonstrada no Gráfico 5 e a estatística na Tabela 4.

Gráfico 5 – Representação das medidas de Folga Livre com utilização do Locotrator.



Fonte: Autoria própria, 2017.

Tabela 4 – Valores das medidas de Folga Livre com utilização do Locotrator.

Número de medições	32
Média	0,79 pol = 20,09 mm
Desvio padrão	0,48 pol = 12,14 mm
Maior valor	2,05 pol = 52,00 mm
Menor valor	0,08 pol = 2 mm
Segundo menor valor	0,16 pol = 4,00 mm

Fonte: Autoria própria, 2017.

Esta medição foi realizada de maneira mais controlada, com um menor número de vagões (lotes menores, de 4 duplas), em comparação à medição com uso de locomotiva. A aderência dos dados é muito maior ao valor determinado pela AAR. Como o esforço trator do TK é muito mais baixo que o da locomotiva, ele torna-se a escolha mais correta para garantir que nenhum ACT fosse comprimido durante o ensaio, garantindo a medida correta das Folgas.

5.1.3 - Medição da Folga de Mandíbula

Como não existem dados documentados sobre os valores de Folga de Mandíbula, foi realizada uma medição com o uso do Locotrator para estimar o valor. A amostragem desta medição não pode ser considerada equivalente as outras medições feitas, porém ela mostra uma tendência do valor para ser considerado nas medições. O procedimento utilizado foi o mesmo da Folga Livre, porém o local de medição foi alterado, como mostrado na Figura 35. A medida foi feita entre o corpo do engate e a mandíbula.

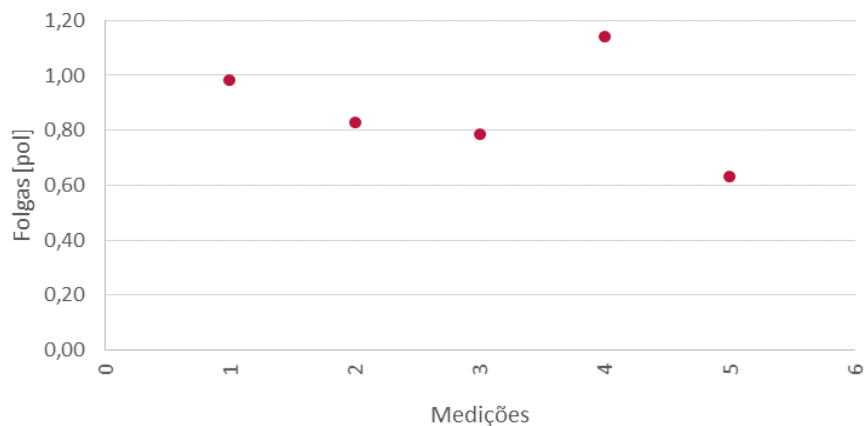
Figura 35 – Fotografia da Folga de Mandíbula.



Fonte: Autoria própria, 2017.

A distribuição de valores de Folga de Mandíbula é apresentada no Gráfico 6 e a estatística na Tabela 5.

Gráfico 6 – Medição da Folga de Mandíbula.
Medidas das Folgas de Mandíbula



Fonte: Autoria própria, 2017.

Tabela 5 – Valores das medidas de Folga de Mandíbula.

Número de medições	5
Média	0,87 pol = 22,20 mm
Desvio padrão	0,18 pol = 4,45 mm
Maior valor	1,14 pol = 28,96 mm
Menor valor	0,63 pol = 16 mm
Segundo menor valor	0,79 pol = 20,07 mm

Fonte: Autoria própria, 2017.

A Folga de Mandíbula medida em campo é proveniente do acoplamento dos engates, sendo o valor que pode ser adotado no simulador. Para isto, é necessário dividir o valor encontrado por cada engate, gerando um valor unitário, como mostrado na Equação 23.

$$F_M = \frac{F_{M \text{ Medido}}}{2} = \frac{0,87}{2} = 0,44" = 11,10 \text{ mm} \quad \text{Eq. 23}$$

5.2 - ALION Simulator 6.2

Para estudar a influência entre as folgas nos CCTs e os choques em composições ferroviárias foi utilizado o programa de simulação de Operação Ferroviária ALION Simulator 6.2, desenvolvido na colaboração entre a Alion Science and Technology Corporation, o Illinois Institute of Technology and Research Institute (IITRI) e o Transportation Technology Center Incorporation (TTCI), no ano de 2002. Uma fotografia do simulador é apresentada na Figura 36.

Figura 36 – Fotografia do simulador ferroviário Alion Simulator 6.2.



Fonte: A autoria própria, 2017.

Este simulador possui um pedestal de operação idêntico aos encontrados nas locomotivas em utilização da EFVM, sendo visto na Figura 36 como a estrutura em cor marrom. Ele é capaz de simular, em condições idênticas às reais, porém os resultados dessas simulações são uma aproximação fiel às operações. Essas aproximações se dão pelo fato do simulador utilizar modelos matemáticos e ajustes de parâmetros medidos empiricamente, para conseguir representar uma condução real. Podemos considerar que os erros de aproximação deste simulador podem ser desprezados, já que este software foi validado pela própria AAR. O código deste simulador segue as expressões da dinâmica ferroviária, citadas no Capítulo 4, por Cole (2006).

A tela de simulação do simulador, vista na Figura 37, traz informações importantes sobre o perfil onde o trem se encontra, situação da pressão no encanamento geral para o sistema de frenagem, velocidade e consumo de combustível.

Figura 37 – Tela de simulação do ALION Simulator 6.2.



Fonte: Autoria própria, 2017.

Os pontos destacados são especificados a seguir, para um melhor entendimento.

- 1) Via de Tráfego: Mostra em qual quilometragem o trem se encontra, desde a locomotiva até a cauda;
- 2) Perfil das Curvas: Mostra as próximas curvas que o trem encontrará, sua direção e seu ângulo de curvatura;
- 3) Perfil de Rampas: Mostra o perfil onde o trem está posicionado, tanto em rampa ascendente ou descendente;
- 4) Posição dos Engates: Mostra a posição dos engates, se os mesmos se encontram comprimidos, esticados e qual a posição relativa em relação ao tamanho do comboio;
- 5) Velocidade e Velocidade Máxima da Via: Mostra a velocidade na qual o trem se encontra e a velocidade máxima permitida (VMA) naquele trecho;
- 6) Aceleração: Mostra a aceleração, positiva ou negativa, na qual o trem está;

- 7) Forças nos Engates: Mostra a força de tração ou compressão que os engates estão submetidos e os pontos de maior esforço;
- 8) Rampa e Ponto de Aceleração: Mostra a inclinação da rampa que a locomotiva se encontra e o ponto de aceleração colocado na máquina;
- 9) Posição: Mostra a posição exata da locomotiva na via, em quilômetros e metros;
- 10) Amperímetro: Mostra a corrente que os motores de tração das locomotivas estão submetidos;
- 11) Freio: Mostra a pressão do sistema de freios da composição (Encanamento Geral, Cilindro de Freio, Reservatório Auxiliar, Reservatório de Emergência e Freio Independente);
- 12) Combustível: Mostra o consumo de combustível do começo da simulação até o ponto atual.

A partir desta tela podemos retirar os valores de choques de tração e compressão máximos produzidos durante a operação.

5.3 - Metodologia empregada nas simulações com o ALION Simulator 6.2

Para esta seção de desenvolvimento, foram propostos dois tipos de simulações:

- i) Simulações Homogêneas: Simulações com valores de folga idênticos em todos os vagões, para avaliar o efeito que os aumentos/diminuições dos valores de Folgas no CCTs podem causar nos valores máximos de choques manifestados na composição;
- ii) Simulações Heterogêneas: Simulações com distribuição alternada de folgas nos vagões, para avaliação dos efeitos de vagões com folgas extremas na composição e suas consequências em outros vagões.

Para a simplificação das simulações do estudo de caso, a montagem da composição será feita de forma convencional (sem a utilização de tração distribuída). Para isso, duas locomotivas GE Dash 9 de 400 hp serão colocadas à frente, Jumpeadas, seguidas de 168 vagões de minério de peso médio de 110 toneladas. Essa configuração de 168 vagões é equivalente a dois lotes utilizados na EFVM, de 84 vagões. Nesta operação, as duas locomotivas trabalham de forma síncrona, ou seja, toda a operação realizada pela primeira locomotiva é repetida pela segunda, sendo esta controlada pela primeira através do cabo

Jumper, de onde o termo é proveniente. As folgas utilizadas em cada cenário são demonstradas na Tabela 6.

Tabela 6 – Folgas Totais utilizadas nas simulações.

Folga Total	por engate
171 mm	6 3/4 pol
159 mm	6 1/4 pol
146 mm	5 3/4 pol
133 mm	5 1/4 pol
121 mm	4 3/4 pol
108 mm	4 1/4 pol

Fonte: Autoria própria, 2017.

O valor de 108 milímetros (108 mm) é equivalente ao somatório da Folga de Curso do ACT e da Folga Livre determinada pela AAR. Os valores seguintes foram acrescidos de 0,5 polegadas (0,5”), simulando a presença de Folga de Mandíbula e Folga Livre acima do valor estabelecido em norma. A seguir serão apresentados os cenários utilizados para as simulações homogêneas e heterogêneas.

5.3.1 - Simulações Homogêneas

Foram escolhidas quatro situações diferentes para a avaliação das folgas, onde 3 são provenientes de ações de frenagem e uma de arrancada de composição. Esses cenários foram escolhidos devido ao maior histórico de ocorrências de descarrilamentos e/ou quebra de engates para trens de tração convencional.

Cenário 1: Arrancada de composição.

- Ação: Arrancada do trem em linha sem curvas e sem rampas, em ponto 8;
- Posição inicial dos engates: Encolhido;
- $v = 0$ km/h.

Cenário 2: Emergência indesejada na 43ª dupla.

- Ação: Composição encontra-se balanceada em cume (metade do trem está descendo a crista, enquanto metade posterior ainda está subindo a rampa), quando uma emergência indesejada, do inglês Undesired Emergency (UDE),

ocorre na 43ª dupla de vagões, ocasionando a frenagem total da composição através da propagação de emergência do meio para as extremidades;

- Posição inicial dos engates: Misto;
- $v = 36$ km/h.

Cenário 3: Emergência devido a ocupação da linha.

- Ação: Trem sobe rampa em ponto 8 de aceleração quando é obrigado a aplicar frenagem de emergência na composição e aplicação total do freio independente das locomotivas, para a parada mais rápida, em ocorrência de risco de atropelamento;
- Posição inicial dos engates: Esticado;
- $v = 30$ km/h.

Cenário 4: Frenagem devido a velocidade acima da máxima permitida.

- Ação: Trem percorre perfil em bacia e é penalizado pelo sistema de monitoramento de velocidade ao ultrapassar a VMA;
- Posição inicial dos engates: Esticado (erro operacional, pois os engates deveriam estar encolhidos devido ao perfil da via);
- $v = 55$ km/h.

5.3.2 - Simulações Heterogêneas

As composições ferroviárias reais não conseguem trabalhar com uma distribuição homogênea de folgas, pois em um mesmo lote é possível encontrar tanto vagões recém mantidos, quanto vagões com planos de manutenção a vencer, como mostrado nos Gráficos 4 e 5, nas medições de Folgas em campo. Essa heterogeneidade nas distribuições de folgas pode gerar consequências para a dinâmica longitudinal. Para ilustrar o comportamento dos choques nessas composições, elencamos alguns casos de estudo, mostrados abaixo.

Cenário 5: Trem com vagões acima da média estipulada.

- Ação: Composição arranca em plano perfeito, com ponto 8, possuindo 12 vagões com folgas acima do valor estipulado, intercalados com outros vagões que se encontram dentro dos padrões de folga;
- Posição inicial dos engates: Encolhido;

- Média da Composição: $4,33'' = 110 \text{ mm}$;
- Valor da folga estipulada: $4,25'' = 108 \text{ mm}$;
- Valor da folga fora dos padrões: $5,25'' = 133 \text{ mm}$.

Cenário 6: Trem com vagões abaixo da média estipulada.

- Ação: Composição arranca em plano perfeito, com ponto 8, possuindo 12 vagões com folgas abaixo do valor estipulado, intercalados com outros vagões que se encontram dentro dos padrões de folga;
- Posição inicial dos engates: Encolhido;
- Média da Composição: $4,33'' = 110 \text{ mm}$;
- Valor da folga estipulada: 122 mm;
- Valor da folga fora dos padrões: 109 mm.

Cenário 7: Trem com vagões acima e baixo da média estipulada.

- Ação: Composição arranca em plano perfeito, com ponto 8, possuindo 56 vagões com folgas acima e 56 vagões com folga abaixo do valor estipulado, intercalados com outros vagões que se encontram dentro dos padrões de folga;
- Posição inicial dos engates: Encolhido;
- Média da Composição: $4,33'' = 110 \text{ mm}$;
- Maior valor da folga: 123 mm;
- Menor valor da folga: 97,3 mm.

Cenário 8: Trem em blocos.

- Ação: Composição arranca em plano perfeito, com ponto 8, tendo a primeira metade, que fica ligada a locomotiva, com vagões com folga abaixo do valor estipulado e a outra metade com vagões possuindo folga acima do valor estipulado;
- Posição inicial dos engates: Encolhido;
- Média da Composição: $4,33'' = 110 \text{ mm}$;
- Maior valor da folga: 123 mm;
- Menor valor da folga: 97,3 mm.

Cenário 9: Trem em blocos.

- Ação: Composição arranca em plano perfeito, com ponto 8, tendo a primeira metade, que fica ligada a locomotiva, com vagões com folga acima do valor estipulado e a outra metade com vagões possuindo folga abaixo do valor estipulado;
- Posição inicial dos engates: Encolhido;
- Média da Composição: $4,33'' = 110 \text{ mm}$;
- Maior valor da folga: 123 mm;
- Menor valor da folga: 97,3 mm.

Cenário 10: Trem com folga na média.

- Ação: Composição arranca em plano perfeito, com ponto 8, sendo todas as folgas livres da composição as mesmas;
- Posição inicial dos engates: Encolhido;
- Média da Composição: $4,33'' = 110 \text{ mm}$.

6 - RESULTADOS E DISCUSSÃO

No presente capítulo serão apresentados os resultados das simulações e a discussão. Os dados serão avaliados através do Coeficiente de Pearson r , onde quanto mais próximo o valor chega a 1, maior a chance de linearidade dos dados (COSTA NETO, 2002). Também será mostrado a diferença percentual entre os valores de choques para cada mudança no valor de Folga Livre. O ALION Simulator 6.2 possui uma limitação, na qual somente os 10 maiores valores de choques das composições são relatados com detalhes (vagão, valor e posição geográfica de onde ocorreu o choque). Os choques ocorrem ao longo de todas as composições simuladas, porém os dados aqui apresentados são maiores apresentados em cada simulação.

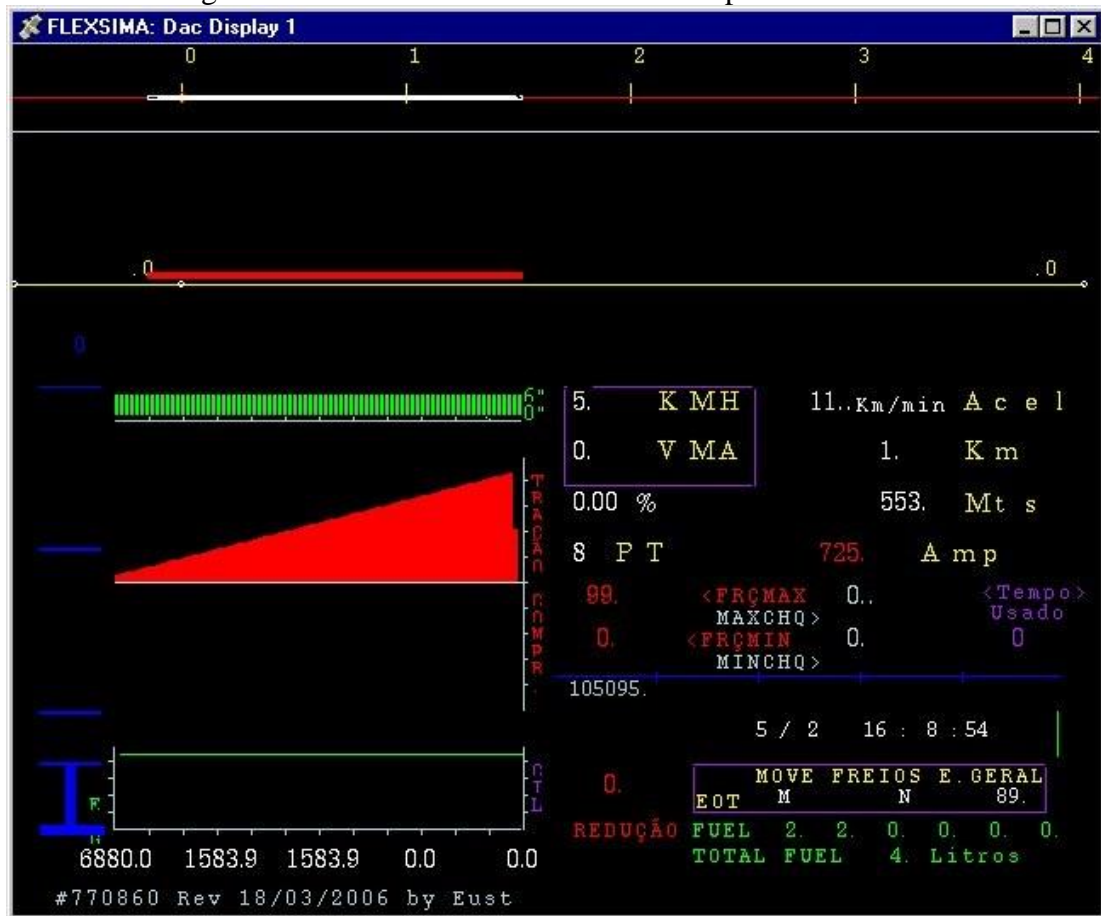
6.1 - Simulações Homogêneas

Cenário 1: Arrancada de composição.

As informações geradas na tela do ALION Simulator 6.2 para o cenário 1, são mostradas na Figura 38. Os resultados das simulações para este cenário são mostrados nos Gráficos 7 e 8.

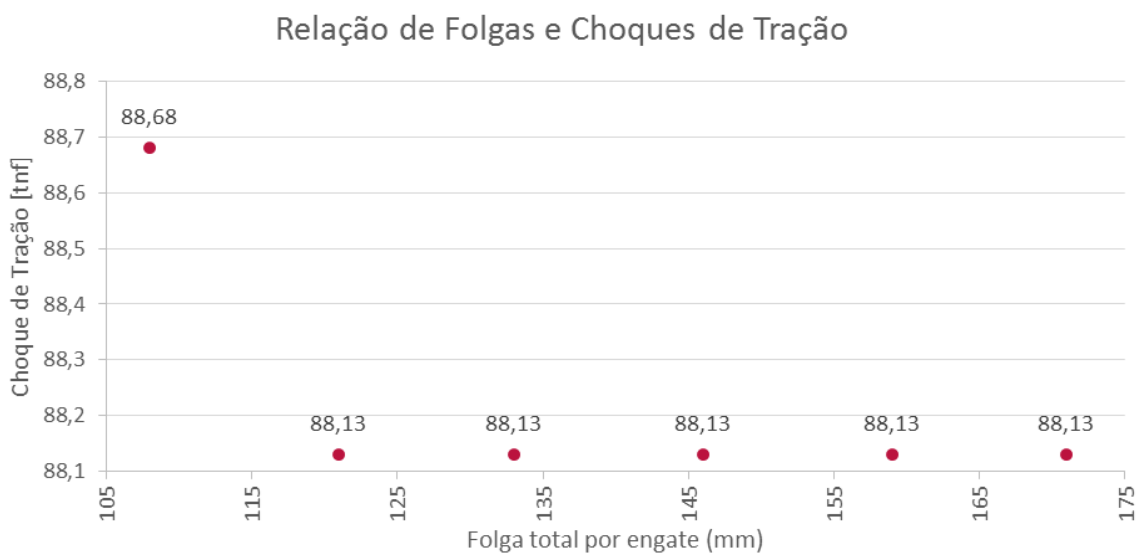
Para este cenário, o comboio encontrava-se em repouso, com as folgas dos engates encolhidas (trem com as Folgas Livres comprimidas). Os 8 pontos de aceleração foram colocados diretamente nas duas Dash9, retirando qualquer erro por mudança de tempo na aplicação dos pontos por um operador, para cada simulação de Folgas diferentes. A Figura 38 mostra a tela do ALION Simulator 6.2 para o caso de maior folga (171 mm), após todos os choques de tração cessarem, mantendo somente as forças de tração nos engates.

Figura 38 – Tela do ALION Simulator 6.2 para o cenário 1.



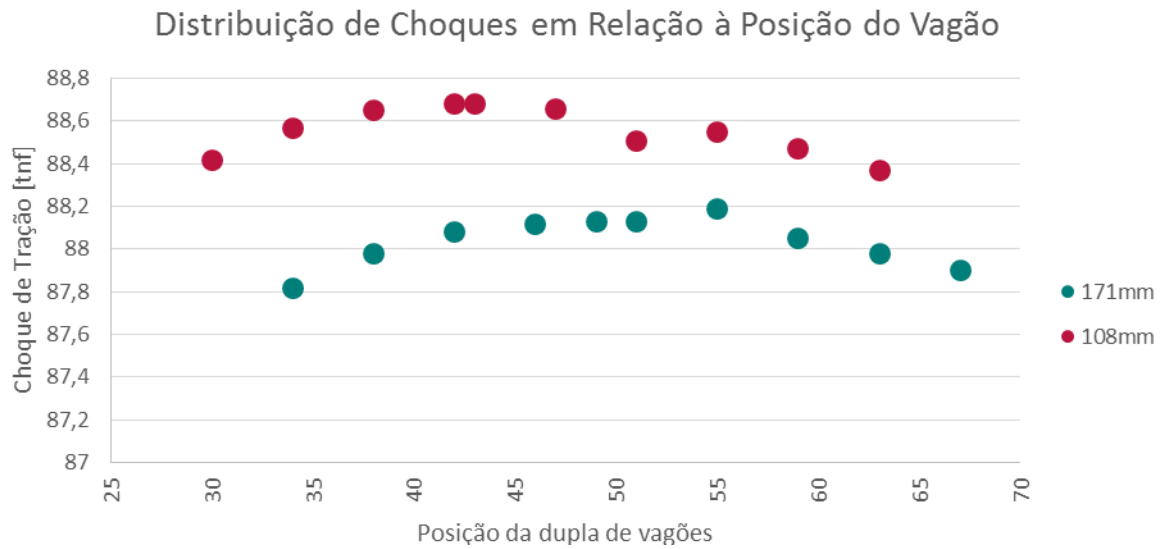
Fonte: Autoria própria, 2017.

Gráfico 7 – Distribuição dos maiores valores de choques de tração em relação às Folgas Totais para o cenário 1.



Fonte: Autoria própria, 2017.

Gráfico 8 – Distribuição dos choques de tração em relação a posição do vagão para o cenário 1.



Fonte: Autoria própria, 2017.

No Gráfico 7, a distribuição dos maiores valores de choques nas composições não possui um comportamento linear, sendo que o maior choque ocorre quando a composição está com o menor valor de Folga (108 mm). O teste de Correlação de Pearson para este cenário é dado pela Tabela 7 e nas Equações 24, 25 e 26.

Tabela 7 – Cálculo do coeficiente de Pearson para o cenário 1.

Folga	Choque	Média X	Média Y	Desvio X	Desvio Y	DXDY	(DesvioX) ²	(DesvioY) ²
X	Y	X _m	Y _m	(X _i - X _m)	(Y _i - Y _m)	(X _i - X _m) * (Y _i - Y _m)	(X _i - X _m) ²	(Y _i - Y _m) ²
171	88,13	139,67	88,22	31,33	-0,09	-2,87	981,78	0,01
159	88,13	139,67	88,22	19,33	-0,09	-1,77	373,78	0,01
146	88,13	139,67	88,22	6,33	-0,09	-0,58	40,11	0,01
133	88,13	139,67	88,22	-6,67	-0,09	0,61	44,44	0,01
121	88,13	139,67	88,22	-18,67	-0,09	1,71	348,44	0,01
108	88,68	139,67	88,22	-31,67	0,46	-14,51	1002,78	0,21
838	529,33	838,00	529,33	5,68E-14	8,527E-14	-17,42	2791,33	0,25

Fonte: Autoria própria, 2017.

$$r = \frac{C(X, Y)}{S_y \cdot S_x} \quad \text{Eq. 24}$$

$$C(X, Y) = \frac{\sum (X_i - X_m) \cdot (Y_i - Y_m)}{n} \quad \text{Eq. 25}$$

$$r = \frac{-17,4167}{21,569 \cdot 0,205} = -0,657 \quad \text{Eq. 26}$$

O coeficiente de significância (t_c) deste teste foi calculado, dado pelas Equações 27 e 28, mostradas abaixo.

$$t_c = \frac{r\sqrt{n-2}}{\sqrt{1-r^2}} \quad \text{Eq. 27}$$

$$t_c = \frac{-0,657\sqrt{6-2}}{\sqrt{1-(-0,657)^2}} = \frac{(-0,657) \cdot 2}{\sqrt{1-0,4311}} = -1,741 \quad \text{Eq. 28}$$

Considerando um nível de significância de 5% e n-2 graus de liberdade, temos que o valor do coeficiente de criticidade ($t_{critico}$) é dado pela Equação 29.

$$t_{crit} = 2,776 \quad \text{Eq. 29}$$

Como o valor do coeficiente de significância é menor que o de criticidade ($t_c < t_{crit}$), não existem evidências suficientes para comprovar que existe relação entre as folgas e os choques. Este caso é bem explicado, pois não existe um grande diferencial de velocidades, que poderia ser gerado pela mudança de velocidade ou de perfil (a simulação foi feita em plano perfeito, não gerando modificação no estado dos CCTs, e a diferença de velocidades dos veículos na arrancada é baixa) entre os vagões. As folgas mais justas dificultam a arrancada do trem, como citado por Brina (1982) e Singh (1960).

Cenário 2: Emergência indesejada na 43ª dupla.

As informações geradas na tela do ALION Simulator 6.2 para o cenário 2, são mostradas na Figura 39. Os resultados das simulações para este cenário são mostrados nos Gráficos 9 e 10.

O trem encontra-se balanceado, com metade dos vagões em perfil ascendente e metade em perfil descendente, seguindo para a direita, sem pontos de aceleração ou frenagem dinâmica. Este processo é feito para aproveitar a energia cinética da composição e reduzir o consumo de combustível. Uma UDE ocorre na 43ª dupla de vagões, frenando toda a composição do meio para as pontas, como mostrado na Figura 39.

No momento em que a UDE começa a atuar, a maior parte do trem encontra-se descendo a crista, puxando os vagões da cauda por inércia. Os vagões que estão em perfil

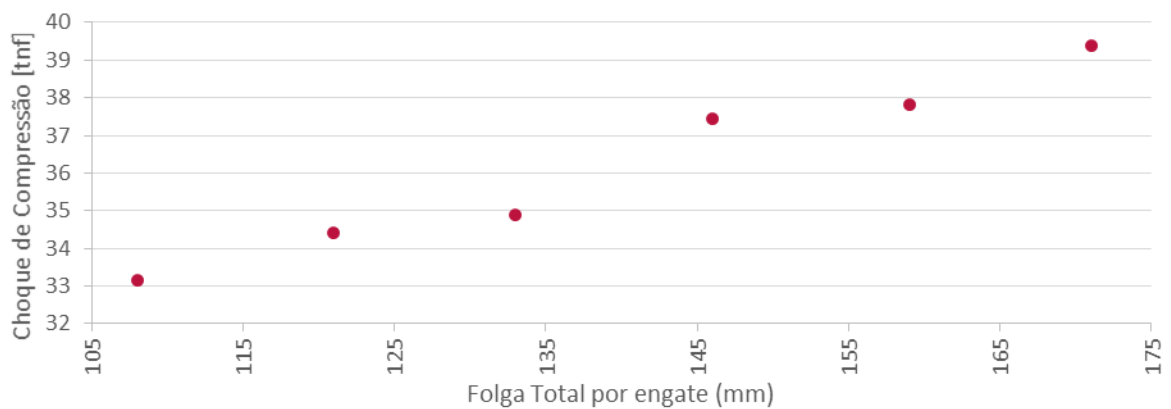
ascendente sofrem choque de compressão e os em perfil descendente, de tração. Como a maior massa da composição está descendo, ela “puxa” os vagões da cauda, comprimindo toda a composição, até a locomotiva. Este comportamento pode ser visto no Gráfico 10.

Figura 39 – Representação da aplicação de UDE no cenário 2.



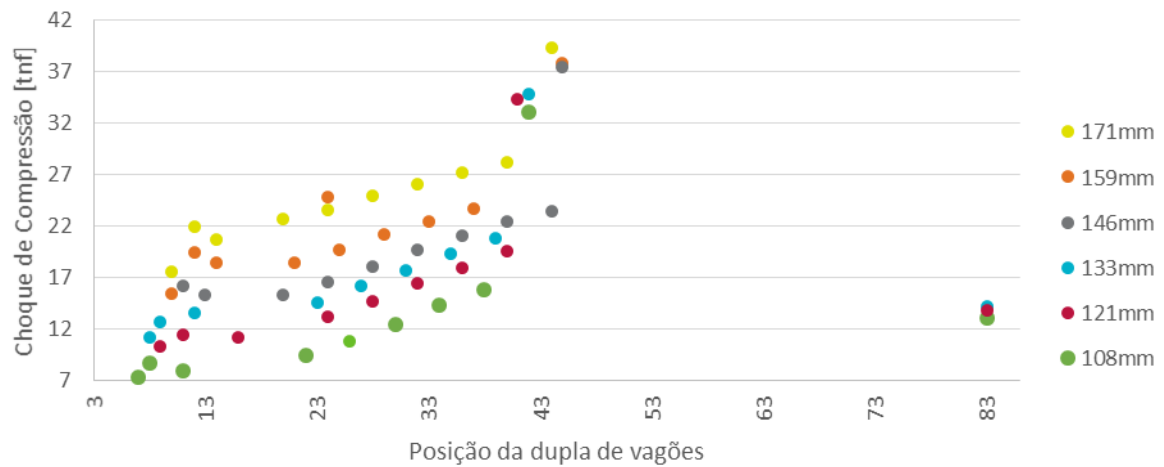
Fonte: Autoria própria, 2017.

Gráfico 9 – Distribuição dos maiores valores de choques de compressão em relação às Folgas Totais para o cenário 2.



Fonte: Autoria própria, 2017.

Gráfico 10 – Distribuição dos choques de compressão em relação a posição do vagão para o cenário 2.



Fonte: Autoria própria, 2017.

O Gráfico 9 mostra uma linearidade clara entre as duas variáveis, quando é considerado o valor máximo de choques de compressão, onde o aumento percentual é de 19%, em comparação ao valor de folga mais reduzido, como mostrado na Tabela 8.

Tabela 8 – Aumento percentual dos choques máximos em relação às Folgas para o cenário 2.

Folga Total por engate [mm]	Choque Máximo de Compressão [tnf]	Aumento %
171	39,39	19%
159	37,82	14%
146	37,46	13%
133	34,88	5%
121	34,42	4%
108	33,14	-

Fonte: Autoria própria, 2017.

O teste de correlação de Pearson para estes valores (Gráfico 10) de choque é dado na Tabela 9, abaixo e nas Equações 30, 31 e 32.

Tabela 9 – Cálculo do coeficiente de Pearson para o cenário 2.

Folga	Choque	Média X	Média Y	Desvio X	Desvio Y	DXDY	(DesvioX) ²	(DesvioY) ²
X	Y	X _m	Y _m	(X _i - X _m)	(Y _i - Y _m)	(X _i - X _m) * (Y _i - Y _m)	(X _i - X _m) ²	(Y _i - Y _m) ²
171	39,39	139,67	36,19	31,33	3,21	100,42	981,78	10,27
159	37,82	139,67	36,19	19,33	1,64	31,61	373,78	2,67
146	37,46	139,67	36,19	6,33	1,28	8,08	40,11	1,63
133	34,88	139,67	36,19	-6,67	-1,31	8,70	44,44	1,70
121	34,42	139,67	36,19	-18,67	-1,77	32,95	348,44	3,12
108	33,14	139,67	36,19	-31,67	-3,05	96,43	1002,78	9,27
838	217,11	838,00	217,11	5,68E-14	-7,1054E-15	278,18	2791,33	28,66

Fonte: Autoria própria, 2017.

$$r = \frac{46,363}{21,569 \cdot 2,186} = 0,984 \quad \text{Eq. 30}$$

O teste de correlação teve um valor muito elevado, mostrando uma correlação entre as duas variáveis de 98,4%. O coeficiente de significância (t_c) para este teste foi calculado na Equação 31.

$$t_c = \frac{0,984\sqrt{6-2}}{\sqrt{1-0,984^2}} = \frac{0,984 \cdot 2}{\sqrt{1-0,968}} = 11,046 \quad \text{Eq. 31}$$

Considerando um nível de significância de 5% e n-2 graus de liberdade, temos que o valor do coeficiente de criticidade ($t_{critico}$) é dado pela Equação 32.

$$t_{crit} = 2,776 \quad \text{Eq. 32}$$

Como o valor do coeficiente de significância é maior que o de criticidade ($t_c > t_{crit}$), existem evidências suficientes para comprovar que existe relação entre as folgas e os maiores valores de choques. Este caso é bem explicado pois existe um grande diferencial de velocidades entre os veículos, gerado pela inércia da massa da composição e pelo perfil.

O Gráfico 10 mostra que existe uma relação entre às Folgas e os choques ocasionados ao longo do trem, e não somente nos pontos de maiores choques da composição. Esse aumento é mostrado pela Tabela 10, onde foram comparados vagões que receberam choques na mesma posição, para diferentes valores de folga.

Tabela 10 – Aumento percentual dos choques em vagões ao longo da composição, para o cenário 2.

Folga Total por engate [mm]	Choque Máximo na Dupla 12 [tnf]	Aumento %	Choque Máximo na Dupla 24 [tnf]	Aumento %	Choque Máximo na Dupla 36 [tnf]	Aumento %
171	21,99	61%	23,65	79%	27,3	51%
159	19,48	43%				
146			16,6	26%	21,09	17%
133	13,65	-				
121			13,19	-	18,04	-
108						

Fonte: Autoria própria.

A Tabela 10 mostra que o comportamento de correlação entre folgas e choques ocorre também ao longo do comboio, e não somente na região onde ocorre a UDE.

Cenário 3: Emergência devido a ocupação da linha.

As informações geradas na tela do ALION Simulator 6.2 para o cenário 3, são mostradas na Figura 40. Os resultados das simulações para este cenário são mostrados nos Gráficos 11 e 12.

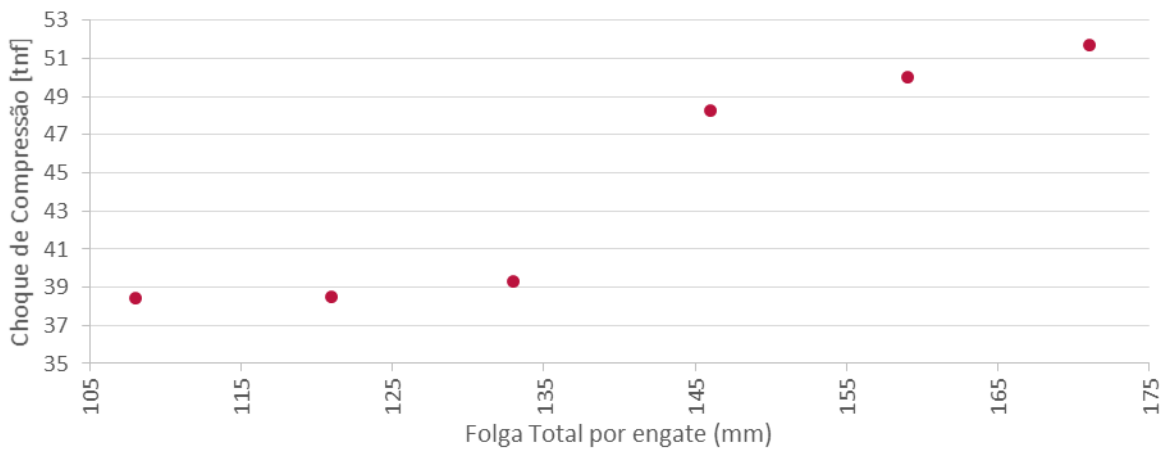
A composição encontra-se em rampa ascendente, com 8 pontos de aceleração, com metade da composição inscrita em curva para a esquerda, de 2,0 graus, e a cauda inscrita em curva para a direita, de 1,5 graus. Neste instante é simulada a parada emergencial do trem, devido a ocupação da linha férrea, causando risco de vida, sendo aplicada frenagem total em todos os vagões e frenagem independente nas locomotivas. A distribuição de frenagem ocorre da locomotiva para a cauda. A Figura 40 mostra a composição em rampa, antes da aplicação da frenagem emergencial.

Figura 40 – Representação do trem em rampa ascendente.



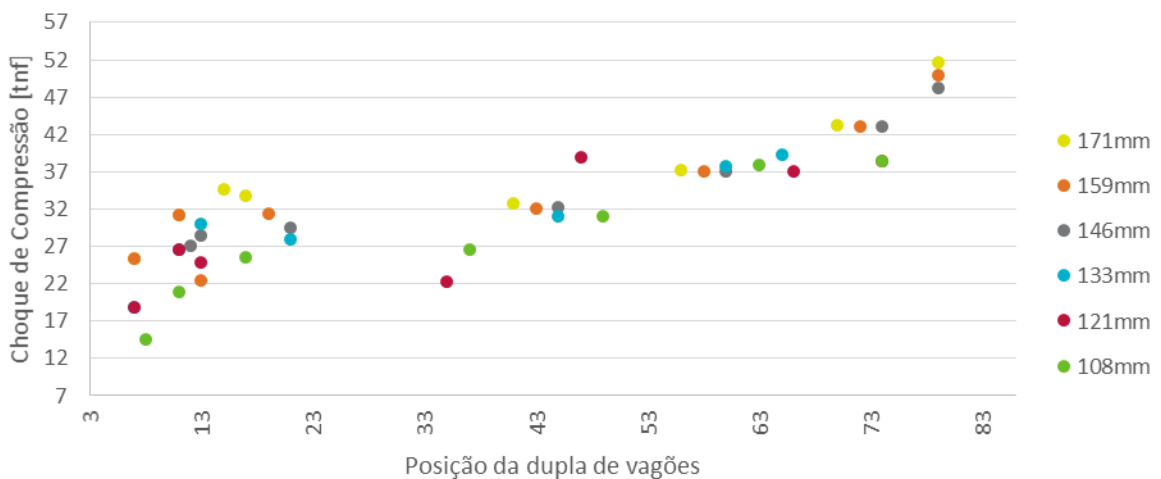
Fonte: Autoria própria.

Gráfico 11 – Distribuição dos maiores valores de choques de compressão em relação às Folgas Totais para o cenário 3.



Fonte: Autoria própria.

Gráfico 12 – Distribuição dos choques de compressão em relação a posição do vagão para o cenário 3.



Fonte: Autoria própria, 2017.

O Gráfico 11 mostra uma grande diferença entre os valores dos choques de compressão, principalmente entre os dados referentes às Folgas de 133 milímetros (133 mm) e 146 milímetros (146 mm). A Tabela 11 mostra que esta diferença é de 26%, sendo que o aumento percentual total para este cenário é de 34%.

Tabela 11 – Aumento percentual dos choques de compressão máximos em relação às Folgas Totais para o cenário 3.

Folga Total por engate [mm]	Choque Máximo de Compressão [tnf]	Aumento %
171	51,7	34%
159	50,02	30%
146	48,3	26%
133	39,33	2%
121	38,48	0%
108	38,45	-

Fonte: Autoria própria, 2017.

De acordo com FRA (2002), o valor máximo de choque que um engate tipo F pode suportar é de 45 kgf. Os valores de choques máximos para este cenário ultrapassaram este de referência, para Folgas Totais acima de 133 milímetros (133 mm), equivalentes à 5 ¼ polegadas (5 ¼”), que pode ser comparável a soma das Folgas Livre, de Curso do ACT e de Mandíbula.

O teste de correlação de Pearson para estes valores (Gráfico 11) de choque de compressão é dado na Tabela 12, abaixo e nas Equações 33, 34 e 35.

Tabela 12 – Cálculo do coeficiente de Pearson para o cenário 3.

Folga	Choque	Média X	Média Y	Desvio X	Desvio Y	DXDY	(DesvioX) ²	(DesvioY) ²
X	Y	X _m	Y _m	(X _i - X _m)	(Y _i - Y _m)	(X _i - X _m)*(Y _i - Y _m)	(X _i - X _m) ²	(Y _i - Y _m) ²
171	51,7	139,67	44,38	31,33	7,32	229,36	981,78	53,58
159	50,02	139,67	44,38	19,33	5,64	109,04	373,78	31,81
146	48,3	139,67	44,38	6,33	3,92	24,83	40,11	15,37
133	39,33	139,67	44,38	-6,67	-5,05	33,67	44,44	25,50
121	38,48	139,67	44,38	-18,67	-5,90	110,13	348,44	34,81
108	38,45	139,67	44,38	-31,67	-5,93	187,78	1002,78	35,16
838	266,28	838,00	266,28	5,68E-14	2,842E-14	694,81	2791,33	196,24

Fonte: Autoria própria, 2017.

$$r = \frac{115,802}{21,569 \cdot 5,719} = 0,939 \quad \text{Eq. 33}$$

O teste de correlação teve um valor satisfatório, mostrando uma correlação entre as duas variáveis de 93,9%. O coeficiente de significância (t_c) para este teste foi calculado na Equação 34.

$$t_c = \frac{0,939\sqrt{6-2}}{\sqrt{1-0,939^2}} = \frac{0,939 \cdot 2}{\sqrt{1-0,8813}} = 5,451 \quad \text{Eq. 34}$$

Considerando um nível de significância de 5% e n-2 graus de liberdade, temos que o valor do coeficiente de criticidade ($t_{critico}$) é dado pela Equação 35.

$$t_{crit} = 2,776 \quad \text{Eq. 35}$$

Como o valor do coeficiente de significância é maior que o de criticidade ($t_c > t_{crit}$), existem evidências suficientes para comprovar que existe relação entre as folgas e os maiores valores de choques. Este caso é bem explicado pois existe um grande diferencial de velocidades entre os veículos, gerado pela inércia da massa da composição e o tempo de ação dos freios. Enquanto a locomotiva e os primeiros vagões estão sendo freados, os vagões da cauda ainda estão acelerados, comprimindo a composição, sendo que, quanto mais próximo da cauda, maior o diferencial de velocidades e maior o choque.

O Gráfico 12 mostra uma maior linearidade entre os dados a partir da 34ª de vagões, sendo que a primeira região (das duplas 5 a 22) possui um comportamento mais ambíguo. Para analisar os dados nesta região e também próximo a cauda da composição, foi feita a Tabela 13, onde é comparado o aumento percentual dos choques em vagões, na mesma posição na composição, para diferentes valores de folga. Para a dupla 11, o aumento percentual em relação à Folga foi de 49% e na dupla 13, de 34%.

Tabela 13 – Aumento percentual dos choques de compressão em vagões ao longo da composição, para o cenário 3.

Folga	Choque Máximo na Dupla 7 [tnf]	Aumento %	Choque Máximo na Dupla 11 [tnf]	Aumento %	Choque Máximo na Dupla 13 [tnf]	Aumento %	Choque Máximo na Dupla 60 [tnf]	Aumento %
171	25,44	35%	31,23	49%				
159	25,44	35%	31,23	49%	33,4	34%		
146							36,99	4%
133	18,85	0%	26,65	27%	30,07	21%	35,73	-
121	18,85	-			24,9	-		
108			20,98	-				

Fonte: Autoria própria, 2017.

A Tabela 13 mostra que o comportamento de correlação é aplicável para todo o trem, não somente para os maiores choques, ocasionados na cauda.

Cenário 4: Frenagem devido a ultrapassagem da velocidade máxima permitida.

As informações geradas na tela do ALION Simulator 6.2 para o cenário 4, são mostradas na Figura 41. Os resultados das simulações para este cenário são mostrados nos Gráficos 13 e 14.

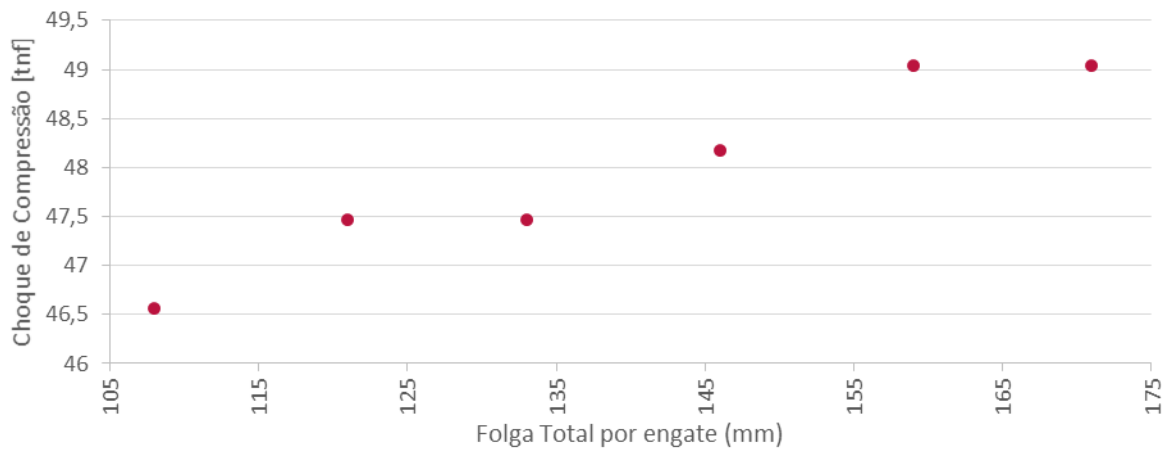
Para este cenário, a composição encontra-se em rampa descendente, indo para a direita com 8 pontos de aceleração, para esticar os engates. Esta é uma operação condenada na EFVM, mas que ainda pode ocorrer, pois o operador tenta atingir uma velocidade maior ao final da rampa descendente para ter energia suficiente para superar a rampa ascendente a frente. A composição começa a 55 km/h e acelerando, quando atinge a velocidade máxima permitida da via (60 km/h) e sofre uma penalização de velocidade, onde toda a composição sofre frenagem emergencial, até a sua parada total. A Figura 41 mostra o trem no início de seu movimento, a 55 km/h.

Figura 41 – Representação do trem em bacia.



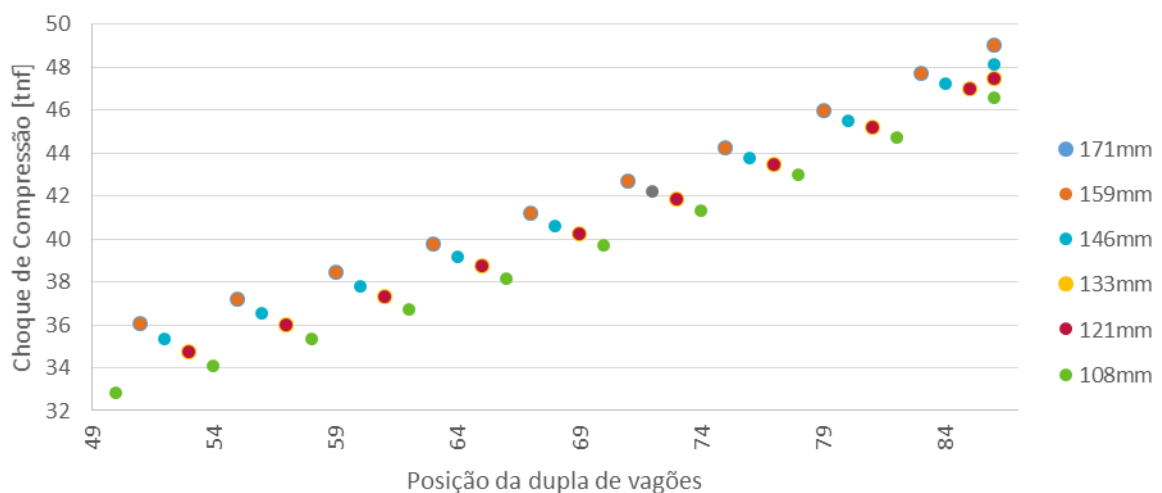
Fonte: Autoria própria, 2017.

Gráfico 13 – Distribuição dos maiores valores de choques de compressão em relação às Folgas Totais para o cenário 4.



Fonte: Autoria própria, 2017.

Gráfico 14 – Distribuição dos choques de compressão em relação a posição do vagão para o cenário 4.



Fonte: Autoria própria, 2017.

Os Gráficos 13 e 14 mostram uma linearidade entre os valores de choques de compressão no trem, sendo que os 10 valores mais elevados iniciam nas posições 50 a 53 para folgas de 108 a 171 milímetros. Os maiores choques deste cenário concentram-se na cauda da composição, como pode ser visto na Tabela 14 e no Gráfico 13, sendo que a diferença percentual foi de 5%.

Tabela 14 – Aumento percentual dos choques máximos em relação às Folgas para o cenário 4.

Folga Total por engate [mm]	Choque Máximo de Compressão [tnf]	Aumento %
171	49,04	5%
159	49,04	5%
146	48,17	3%
133	47,47	2%
121	47,47	2%
108	46,56	-

Fonte: Autoria própria, 2017.

Os valores máximos de choques mostram o porquê desta operação ser considerada condenada pela Engenharia da EFVM, sendo que todos os valores de choque de compressão foram maiores que o valor de 45 kgf estipulado por FRA (2002).

O teste de correlação de Pearson para estes valores de choque é dado na Tabela 15, abaixo e nas Equações 36, 37 e 38.

Tabela 15 – Cálculo do coeficiente de Pearson para o cenário 4.

Folga	Choque	Média X	Média Y	Desvio X	Desvio Y	DXDY	(DesvioX) ²	(DesvioY) ²
X	Y	X _m	Y _m	(X _i - X _m)	(Y _i - Y _m)	(X _i - X _m) * (Y _i - Y _m)	(X _i - X _m) ²	(Y _i - Y _m) ²
171	49,04	139,67	47,96	31,33	1,08	33,89	981,78	1,17
159	49,04	139,67	47,96	19,33	1,08	20,91	373,78	1,17
146	48,17	139,67	47,96	6,33	0,21	1,34	40,11	0,04
133	47,47	139,67	47,96	-6,67	-0,49	3,26	44,44	0,24
121	47,47	139,67	47,96	-18,67	-0,49	9,12	348,44	0,24
108	46,56	139,67	47,96	-31,67	-1,40	44,28	1002,78	1,96
838	287,75	838,00	287,75	5,68E-14	-1,421E-14	112,7966667	2791,33	4,82

Fonte: Autoria própria, 2017.

$$r = \frac{18,799}{21,569 \cdot 0,896} = 0,973 \quad \text{Eq. 36}$$

O teste de correlação teve um valor satisfatório, mostrando uma correlação entre as duas variáveis de 97,3%. O coeficiente de significância (t_c) para este teste foi calculado na Equação 37.

$$t_c = \frac{0,973\sqrt{6-2}}{\sqrt{1-0,973^2}} = \frac{0,973 \cdot 2}{\sqrt{1-0,9462}} = 8,39 \quad \text{Eq. 37}$$

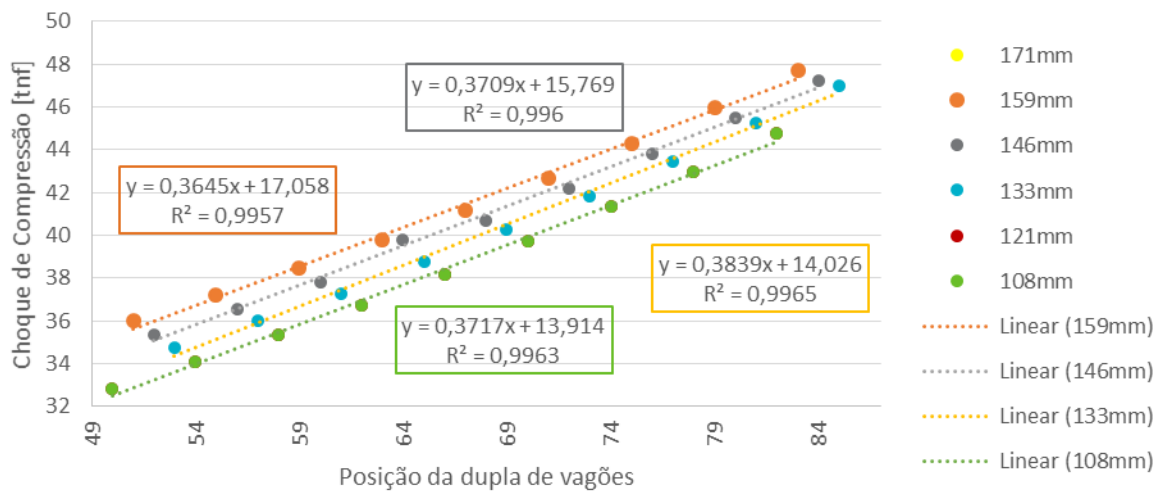
Considerando um nível de significância de 5% e n-2 graus de liberdade, temos que o valor do coeficiente de criticidade ($t_{critico}$) é dado pela Equação 38.

$$t_{crit} = 2,776 \quad \text{Eq. 38}$$

Como o valor do coeficiente de significância é maior que o de criticidade ($t_c > t_{crit}$), existem evidências suficientes para comprovar que existe relação entre as folgas e os maiores valores de choques. Este caso é bem explicado pois existe um grande diferencial de velocidades entre os veículos, gerado pela inércia da massa da composição, o tempo de ação dos freios e o perfil. Enquanto a locomotiva e os primeiros vagões estão sendo freados, os vagões da cauda ainda estão acelerados, comprimindo a composição, sendo que, quanto mais próximo da cauda, maior o diferencial de velocidades e maior o choque. Somado a este fenômeno está o perfil, que tende a comprimir os vagões que estão em nível (na bacia).

Do Gráfico 14 é possível perceber que não houveram choques de valores diferentes nos mesmos vagões, na mesma posição. Com isto, a comparação do aumento percentual dos choques nos mesmos vagões não é possível. Entretanto, pode-se relacionar os dados através das linhas de tendência das distribuições, como mostrado no Gráfico 15.

Gráfico 15: Representação das linhas de tendência das distribuições de choques de compressão do cenário 4.



Fonte: Autoria própria, 2017.

O ajuste das curvas mostra como as distribuições são praticamente paralelas, sendo que o coeficiente de determinação R^2 possui uma variação na terceira casa decimal, e o aumento do valor de Folga desloca as linhas para cima. O aumento percentual no deslocamento das curvas é mostrado na Tabela 16, abaixo.

Tabela 16 – Aumento percentual do deslocamento das linhas de tendência das distribuições de choques de compressão, para o cenário 4.

Folga	Coefficiente Linear (b)	Aumento %
171	17,058	23%
159	17,058	23%
146	15,769	13%
133	14,026	1%
121	13,914	0%
108	13,914	-

Fonte: Autoria própria, 2017.

A Tabela 16 mostra que o comportamento de correlação é aplicável para todo o trem, não somente para os maiores choques, ocasionados na cauda.

6.2 - Simulações Heterogêneas

Os dados das simulações heterogêneas serão comparados entre si e com o cenário 10, que mostra a distribuição de choques em relação às Folgas, para a média estipulada de 4,33 milímetros (4,33 mm). Os gráficos das distribuições serão apresentados juntamente com o gráfico representativo do cenário 10.

As posições dos vagões com folgas diferenciadas para os cenários 5 e 6 são mostrados na Tabela 17, abaixo.

Tabela 17 – Posição dos vagões com folgas alternadas.

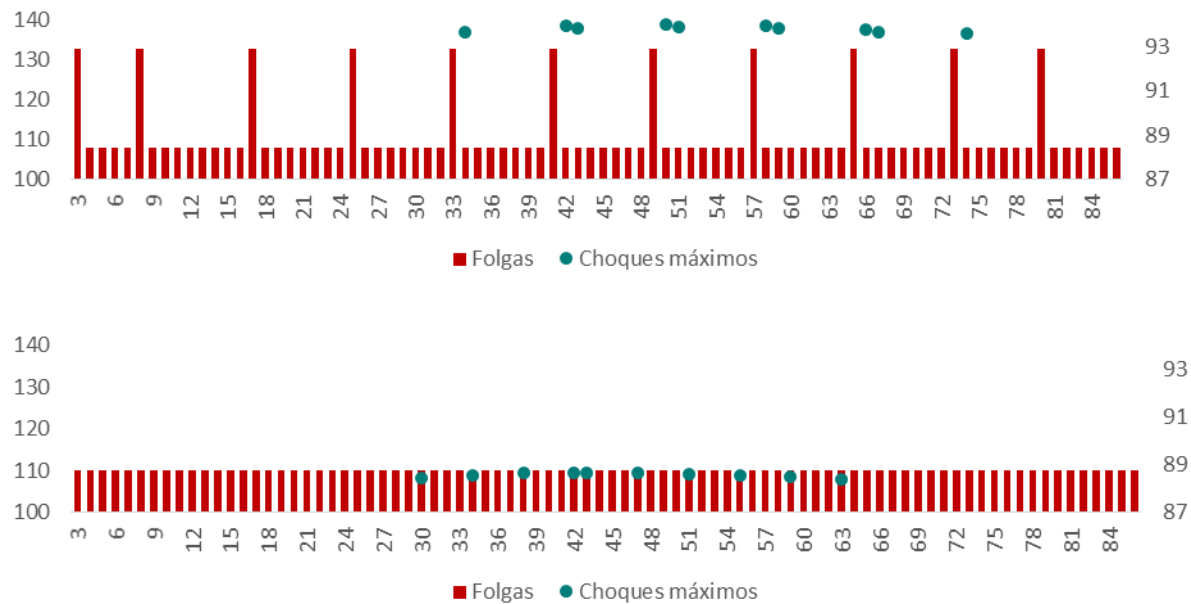
	Posição	3	8	17	25	33	41	49	57	65	73	80
Folga	Cenário 5	133 mm	133 mm	133 mm	133 mm	133 mm	133 mm	133 mm	133 mm	133 mm	133 mm	133 mm
	Cenário 6	109 mm	109 mm	109 mm	109 mm	109 mm	109 mm	109 mm	109 mm	109 mm	109 mm	109 mm

Fonte: Autoria própria, 2017.

Cenário 5: Trem com vagões acima da média estipulada.

Os resultados das simulações feitas no ALION Simulator 6.2 para o cenário 5, são apresentados no Gráfico 16, abaixo. Este cenário tem como objetivo visualizar o como os vagões com folga maior que um valor de média comportam-se na composição.

Gráfico 16 – Distribuição de choques em relação às Folgas para o cenário 5 e 10, respectivamente.



Fonte: Autoria própria, 2017.

Neste cenário, o mesmo procedimento de arrancada do cenário 1 foi efetuado, minimizando qualquer intervenção de um operador. É possível ver que os 10 maiores choques da composição para o cenário heterogêneo atuaram em uma área maior da composição, em comparação com o cenário de folgas homogêneas com a mesma média. Os valores e disposição dos choques também foram alterados, como mostrado na Tabela 18.

Tabela 18 – Comparação entre os cenários 5 e 10.

Cenário 5		Cenário 10		Aumento % / Diferença	
Choque máximo de tração [kgf]	Vagão	Choque máximo de tração [kgf]	Vagão	Choque máximo de tração [kgf]	Vagão
94,02	50	88,68	43	6%	7
93,96	42	88,68	42	6%	0
93,95	58	88,66	47	6%	11
93,89	51	88,65	38	6%	13
93,83	59	88,61	51	6%	8
93,82	43	88,57	34	6%	9
93,81	66	88,55	55	6%	11
93,69	67	88,47	59	6%	8
93,69	34	88,42	30	6%	4
93,61	74	88,37	63	6%	11

Fonte: Autoria própria, 2017.

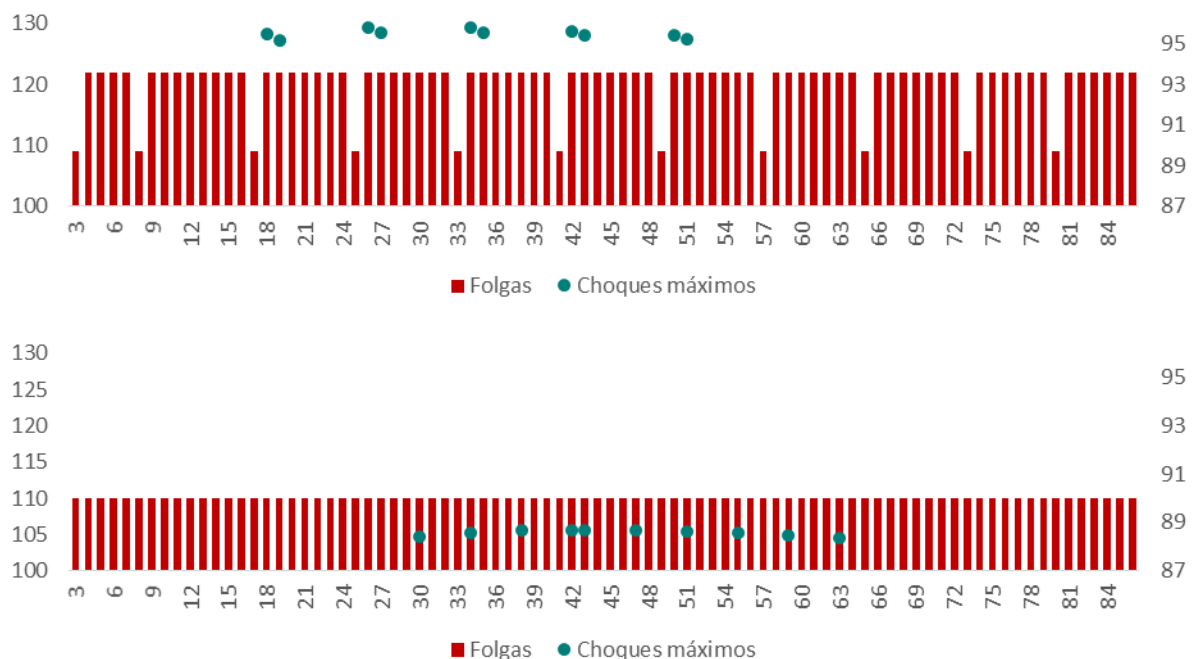
Outro fator importante que pode ser visto no Gráfico 16 é a tendência dos maiores choques terem ocorrido 100% das vezes, logo após o vagão com a folga modificada, para as 10 medições.

Cenário 6: Trem com vagões abaixo da média estipulada.

Os resultados das simulações feitas no ALION Simulator 6.2 para o cenário 6, são apresentados no Gráfico 16. Este cenário tem como objetivo visualizar como os vagões com folga menor que um valor de média (folgas mais justas) comportam-se na composição.

É possível ver que os 10 maiores choques da composição para o cenário heterogêneo atuaram em uma extensão quase idêntica da composição, em comparação com o cenário de folgas homogêneas com a mesma média, sendo que a diferença de vagões dentro da distribuição das maiores folgas é de 3 duplas. Entretanto, os valores e disposição dos choques foram alterados, sendo que os maiores choques de tração para o cenário 6 iniciaram 12 duplas antes do cenário 10, como mostrado no Gráfico 17 e na Tabela 19.

Gráfico 17 – Distribuição de choques em relação às Folgas para o cenário 6 e 10, respectivamente.



Fonte: Autoria própria, 2017.

Tabela 19 – Comparação entre os cenários 6 e 10.

Cenário 6		Cenário 10		Aumento % / Diferença	
Choque máximo de tração [kgf]	Vagão	Choque máximo de tração [kgf]	Vagão	Choque máximo de tração [kgf]	Vagão
95,81	26	88,68	43	8%	17
95,79	34	88,68	42	8%	8
95,63	42	88,66	47	8%	5
95,58	35	88,65	38	8%	3
95,56	27	88,61	51	8%	24
95,46	18	88,57	34	8%	16
95,45	43	88,55	55	8%	12
95,4	50	88,47	59	8%	9
95,24	51	88,42	30	8%	21
95,17	19	88,37	63	8%	44

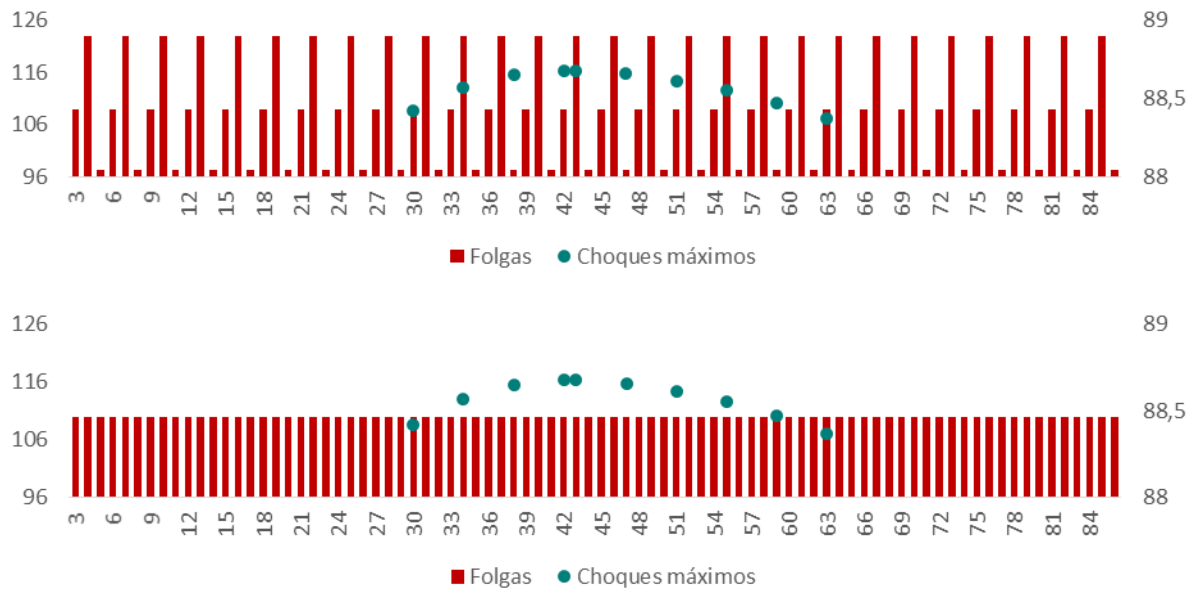
Fonte: Autoria própria, 2017.

Para este cenário podemos ver a mesma tendência do cenário 5, onde 100% das medições encontram-se seguidas dos vagões com folgas alteradas, sendo que este mesmo valor ocorre quando consideramos a localização das mesmas, ocorrendo duplamente após os vagões alterados.

Cenário 7: Trem com vagões acima e baixo da média estipulada.

Os resultados das simulações feitas no ALION Simulator 6.2 para o cenário 7, são apresentados no Gráfico 18 e Tabela 20. Este cenário tem como objetivo visualizar como a composição se comporta com folgas alternadas de maneira regular, seguindo o padrão: Folga com valor médio, folga com valor elevado e folga com o valor abaixo do estipulado (média).

Gráfico 18 – Distribuição de choques em relação às Folgas para o cenário 7 e 10, respectivamente.



Fonte: Autoria própria, 2017.

Tabela 20 – Comparação entre os cenários 7 e 10.

Cenário 7		Cenário 10		Aumento % / Diferença	
Choque máximo de tração [kgf]	Vagão	Choque máximo de tração [kgf]	Vagão	Choque máximo de tração [kgf]	Vagão
88,68	43	88,68	43	0%	0
88,68	42	88,68	42	0%	0
88,66	47	88,66	47	0%	0
88,65	38	88,65	38	0%	0
88,61	51	88,61	51	0%	0
88,57	34	88,57	34	0%	0
88,55	55	88,55	55	0%	0
88,47	59	88,47	59	0%	0
88,42	30	88,42	30	0%	0
88,37	63	88,37	63	0%	0

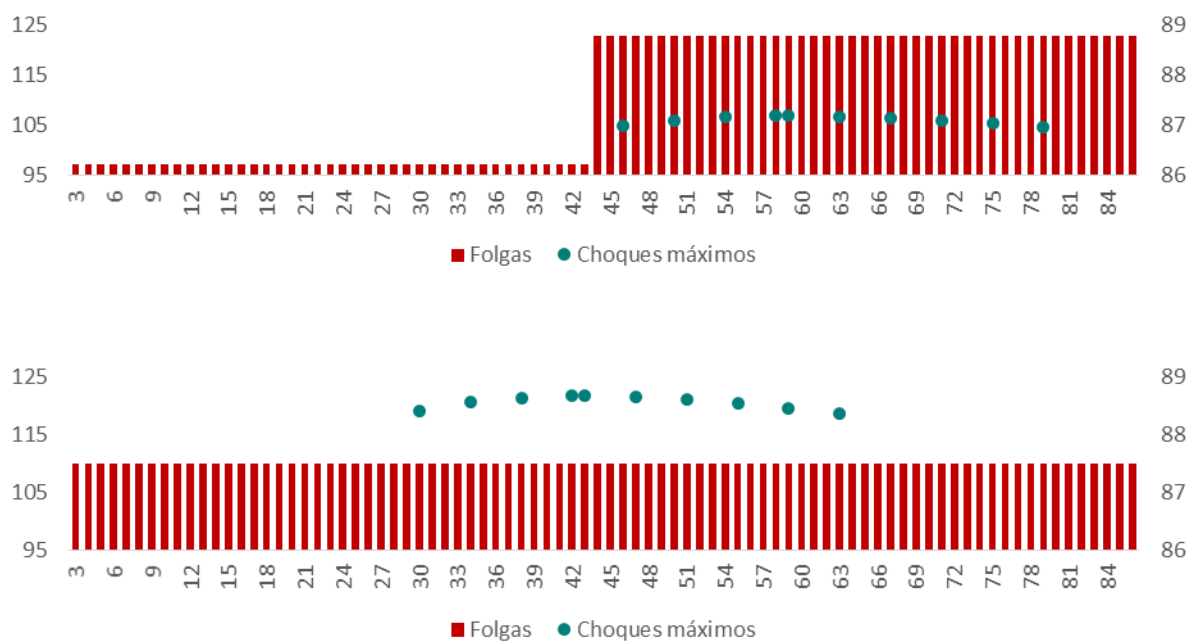
Fonte: Autoria própria, 2017.

Os choques máximos de tração para o cenário 7 possuem um comportamento esperado, onde os mesmos comportam-se de forma exata em relação distribuição homogênea (cenário 10). Isto pode ser visto na Tabela 20, onde não existem diferenças entre os valores de choques e suas posições.

Cenário 8: Trem em blocos.

Os resultados das simulações feitas no ALION Simulator 6.2 para o cenário 8, são apresentados no Gráfico 19. Este cenário tem como objetivo visualizar como a composição se comporta com uma formação em blocos, onde 2 lotes de vagões, com folgas homogêneas no lote e diferentes entre si. Aqui, o primeiro lote possui folgas justas e o segundo, folgas maiores.

Gráfico 19 – Distribuição de choques em relação às Folgas para o cenário 8 e 10, respectivamente.



Fonte: Autoria própria, 2017.

É possível ver que os 10 maiores choques da composição para o cenário de bloqueio atuaram na região dos vagões com as maiores folgas, mantendo a correlação demonstrada nos casos com simulações homogêneas. Os valores de choques neste caso foram menores, em comparação ao cenário 10, diminuindo 2%, e suas localizações foram alteradas em 16 duplas para todas as 10 medições, como pode ser visto na Tabela 21.

Tabela 21 – Comparação entre os cenários 8 e 10.

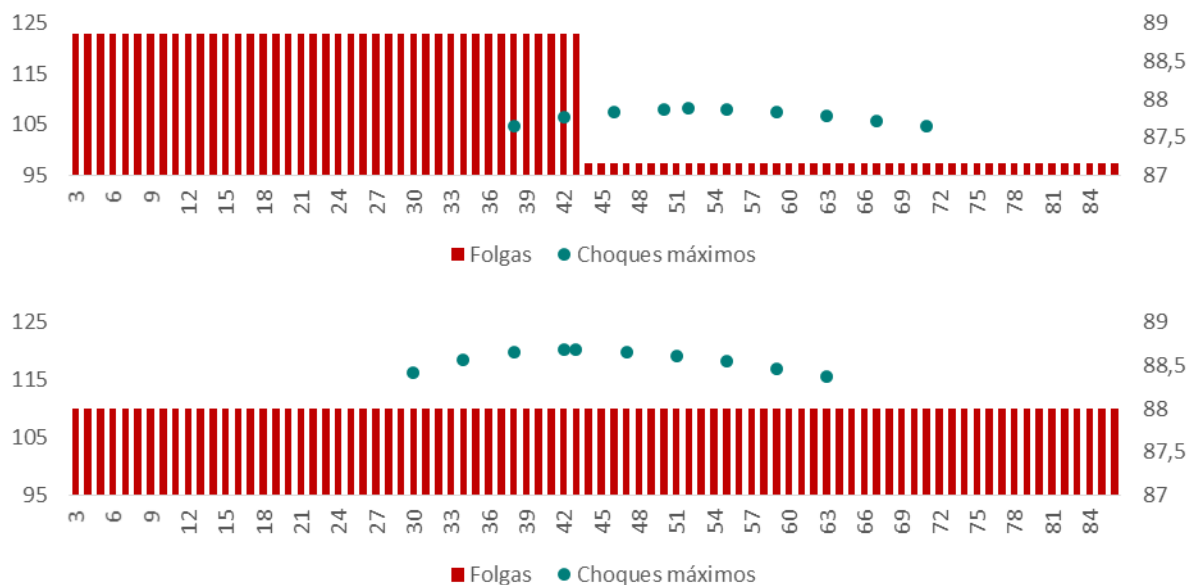
Cenário 8		Cenário 10		Diminuição % / Diferença	
Choque máximo de tração [kgf]	Vagão	Choque máximo de tração [kgf]	Vagão	Choque máximo de tração [kgf]	Vagão
87,19	59	88,68	43	-2%	16
87,19	58	88,68	42	-2%	16
87,18	63	88,66	47	-2%	16
87,17	54	88,65	38	-2%	16
87,15	67	88,61	51	-2%	16
87,11	50	88,57	34	-2%	16
87,11	71	88,55	55	-2%	16
87,05	75	88,47	59	-2%	16
87,01	46	88,42	30	-2%	16
86,96	79	88,37	63	-2%	16

Fonte: Autoria própria, 2017.

Cenário 9: Trem em blocos.

Os resultados das simulações feitas no ALION Simulator 6.2 para o cenário 9, são apresentados no Gráfico 20. Este cenário tem o objetivo oposto do anterior, contando com uma composição com uma formação em blocos, onde o primeiro lote possui folgas maiores e o segundo, folgas menores.

Gráfico 20 – Distribuição de choques em relação às Folgas para o cenário 9 e 10, respectivamente.



Fonte: Autoria própria, 2017.

O Gráfico 20 mostra como os 10 maiores valores de choques foram deslocados para o fim da composição em 8 duplas de vagões, porém mantendo a mesma abrangência. Este fenômeno ocorre devido à vantagem operacional das folgas durante a arrancada, como citado por Brina (1982). Cada vagão é retirado da inércia de maneira individual. Como a folga aplicada no primeiro bloco de vagões é maior que a média (cenário 10), os choques têm menor intensidade e começam a ser captados pelo simulador em posições mais distantes das locomotivas, como mostrado na Tabela 22.

É possível perceber que a tendência dos choques seria aumentar, em comparação ao cenário 10, mas o diferencial de velocidades é baixo e não permite este aumento.

Tabela 22 – Comparação entre os cenários 9 e 10.

Cenário 9		Cenário 10		Diminuição % / Diferença	
Choque máximo de tração [kgf]	Vagão	Choque máximo de tração [kgf]	Vagão	Choque máximo de tração [kgf]	Vagão
87,88	52	88,68	43	-1%	9
87,87	50	88,68	42	-1%	8
87,87	55	88,66	47	-1%	8
87,84	46	88,65	38	-1%	8
87,84	59	88,61	51	-1%	8
87,78	63	88,57	34	-1%	29
87,77	42	88,55	55	-1%	13
87,72	67	88,47	59	-1%	8
87,64	38	88,42	30	-1%	8
87,64	71	88,37	63	-1%	8

Fonte: Autoria própria, 2017.

6.3 - Modelo para distribuição de Folgas

Os Conjuntos de Choque e Tração (CCTs) são aparelhos de extrema importância na operação ferroviária, pois além de conectar os veículos, eles são os primeiros componentes a receber os esforços provenientes da movimentação das composições. A revisão da literatura permitiu apresentar e entender os componentes mecânicos e de amortecimento dos CCTs, sua importância e funcionamento.

As diferentes e poucas literaturas sobre as Folgas dos CCTs demonstram como o assunto é pouco estudado em âmbito nacional e internacional, e como existem diferentes citações sobre o assunto, o que pode ser amplamente especificado neste trabalho, através dos

diferentes valores para Folga Livre e a falta de qualquer documentação sobre a Folga de Mandíbula.

Através de medições em campo, na Oficina de Vagões e na Torre B, no Complexo de Tubarão da Vale S.A; em conjunto com a equipe de Engenharia de Vagões da empresa, foi possível aferir os valores de Folgas Livres para os CCTs dos vagões do tipo GDE da Estrada de Ferro Vitória Minas. É possível afirmar que a média dos veículos se encontram dentro dos padrões estabelecidos pelas normas da AAR, abaixo do valor de 1 polegada (1”), porém foram encontrados veículos que necessitam de tratamento diferenciado por estarem acima do valor mencionado. Foi possível ter uma estimativa do valor da Folga de Mandíbula, através de 5 medições, que resultou em uma folga de 0,87 polegadas (0,87”) por acoplamento, equivalentes a 0,44 polegadas (0,44”) por engate. Este valor foi utilizado como norteador para o presente trabalho, mas não pode ser considerado como regra para todos os vagões da EFVM. Outras aferições devem ser feitas para comprovar a média deste valor de folga.

Considerando os valores de folgas estimados neste trabalho, juntamente com os cenários e diferentes distribuições de folgas ao longo da composição, é possível indicar um modelo para distribuição de folgas, com seus valores, para serem utilizados nos estudos de caso no simulador ALION Simulator 6.2 da EFVM. Este modelo é mostrado a seguir:

- i) Valor de Folga Livre: 1 polegada (1”), de acordo com o valor máximo que a norma da AAR (2007) determina;
- ii) Valor da Folga de Curso do Aparelho de Choque e Tração: $3 \frac{1}{4}$ polegada ($3 \frac{1}{4}$ ”), de acordo com a norma AAR (2007);
- iii) Valor da Folga de Mandíbula: 0,5 polegada (0,5”), sendo uma aproximação da média das Folgas de Mandíbula apresentadas neste trabalho;
- iv) Valor da Folga Total: $4 \frac{3}{4}$ polegada ($4 \frac{3}{4}$ ”), equivalentes à 121 milímetros (121 mm), correspondentes ao somatório das folgas Livre, de Curso do ACT e de Mandíbula;
- v) Distribuição de Folgas: vagões com folgas maiores que o valor de Folga Total, com distribuição aleatória na composição, sendo que a folga maior deve ser o somatório da Folga Total e do desvio padrão das medições de Folga Livre da amostragem medida na Oficina de Vagões, apresentada neste trabalho;

Este modelo foi pensado levando em consideração os valores obtidos nas simulações e medições, mantendo valores acima dos encontrados em campo para um coeficiente de segurança maior que 1.

7 - CONSIDERAÇÕES FINAIS

A seguir as conclusões do trabalho e sugestões para trabalhos futuros serão apresentados.

7.1 - Conclusões

As conclusões são:

- i) É possível comprovar a relação entre o aumento dos valores de folgas nos CCTs e o aumento nos choques em composições ferroviárias através dos cenários de simulações com distribuições homogêneas de folgas, sendo que os coeficientes de correlação de Pearson foram superiores a 95% em todos os cenários com frenagem;
- ii) Foi possível comprovar que não existe correlação entre o aumento de folgas e choques para o cenário de simulação de arrancada, o que é explicado pela forma que a simulação foi conduzida. Como o perfil de via utilizado não possui interferência (plano tangente) e a arrancada possui um baixo diferencial de velocidades entre carros, não existem variações suficientes nas velocidades instantâneas dos vagões para gerar choques;
- iii) A partir de Folgas Totais de 146 milímetros (146 mm), os choques nas simulações homogêneas sofreram um grande aumento. Isto pode ser considerado como um fator determinante para a manutenção dos vagões e segurança operacional, onde a possibilidade de quebra de engates e ocorrências ferroviárias aumenta;
- iv) Existe a tendência de que vagões com folgas muito diferentes do padrão, dispersos em uma composição, geram choques mais elevados nas duas próximas duplas da conexão com os vagões em questão;

- v) É possível afirmar que a formação de composições em blocos pode ser prejudicial para a operação e segurança ferroviária, já que, para o caso de um lote com folgas maiores na região da cauda, existe a tendência dos maiores choques serem concentrados nesta região. Somando esta característica com a movimentação em diferentes perfis, que geram choques mais elevados na cauda, o somatório destas duas situações pode levar os choques a ultrapassarem os valores máximos definidos por FRA (2002). Com isto, podem ocorrer quebras de engates e/ou descarrilamentos.

7.2 - Sugestões para trabalhos futuros

- i) Simular o comportamento das composições com folgas alteradas, a partir de uma distribuição normal de folgas, criando outros vagões com folgas diferenciadas e montando trens com os mesmos;
- ii) Expandir o presente trabalho para o estudo do comportamento destas folgas em composições maiores, com o uso de tração distribuída;
- iii) Investigar as influências das folgas dos CCTs na dinâmica lateral e vertical.

REFERÊNCIAS

- ALTOÉ, Adauto et al. **Manual Técnico de Vagões: PTP00047**. 4. ed. Vitória: Vale, 2011. 237 p.
- AMSTED MAXION. **Manual de Manutenção: Aparelhos de Choque e Tração de Fricção**. Hortolândia: Amstedmaxion, [200-]. 29 p.
- ANDRADE, Eustáquio et al. **Estudo sobre Folgas em Engates**. Vitória: Vale S.A., 2016.
- ANDRADE, E. A. **Operação de Locotrator**. Vitória: Vale S.A., 2015. 163 p.
- ASSOCIATION OF AMERICAN RAILROADS. **MANUAL OF STANDARDS AND RECOMMENDED PRACTICES - SECTION B: Couplers and Freight Cars Draft Components**. Washington: The Association Of American Railroads, 2007. 242 p.
- BARBOSA, Roberto Spinola. **Estudo da Dinâmica Longitudinal do Trem**. 1993. 179 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1993.
- BRANCO, José Eduardo Castello. Investigação: Investigação de Descarrilamentos. In: BRANCO, José Eduardo Castello; FERREIRA, Ronaldo (Ed.). **Tratado de Estradas de Ferro: Prevenção e Investigação de Acidentes**. Rio de Janeiro: Reflexus Estúdio de Reprodução Gráfica, 2002. Cap. 4. p. 310-333.
- BRASIL. Ministério dos Transportes. Confederação Nacional do Transporte. **O Sistema Ferroviário Brasileiro**. Brasília: CNT, 2013. 58 p. Disponível em: <<http://cms.cnt.org.br/Imagens%20CNT/Site%202015/Pesquisas%20PDF/Transporte%20e%20Economia%20E2%80%93%20O%20Sistema%20Ferrovi%C3%A1rio%20Brasileiro.pdf>>. Acesso em: 14 jun. 2016.
- BRASIL. Ministério dos Transportes. Secretaria de Política Nacional de Transportes. **Projeto de Reavaliação de Estimativas e Metas do PNL T: Plano Nacional de Logística e Transportes**. Brasília: SPNT, 2012. Relatório Final. 260 p. Disponível em: <<http://www.transportes.gov.br/images/2014/11/PNL T/2011.pdf>>. Acesso em: 14 jun. 2016.
- BRINA, Helvécio Lapertosa. **Estradas de Ferro 2: Tração - Frenagem - Material Rodante – Circulação de Trens**. Rio de Janeiro: Ltc, 1982. 2 v.
- CENTRO DE ENGENHARIA LOGÍSTICA. **Apresentação do Centro**. Vitória: Gerência de Capacitação e Tecnologia, 2015. 58 slides, color.
- COLE, Colin. Longitudinal Train Dynamics. In: IWNICKI, Simon (Ed.). **Handbook of Railway Vehicle Dynamics**. Boca Raton: Crc Press, 2006. p. 239-277.
- DUKKIPATI, R.V. **Vehicle Dynamics**, CRC, Boca Raton, Florida, USA, 2000.
- COSTA NETO, Pedro Luiz de Oliveira. **Estatística**. 3. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2002. 261 p.

EHRENBECK, R., POLCARI, S. **Vehicle/Track Interaction Assessment Techniques**. U.S. Department of Transportation, Report n° DOT/FRA/ORD-84/01.2, 1984.

FEDERAL RAILROAD ADMINISTRATION. **RESEARCH PROGRAM ON TRACK TRAIN DYNAMICS R-185**: Track Train Dynamics to Improve Freight Train Performance. 2 ed. Washington: Association Of American Railroads, 2002

GARG, V. DUKKIPATI, R. **Dynamics of railway vehicle systems**. Academic Press, New York: 1984.

HIBBELER, R.C.. **Dinâmica**: Mecânica para Engenharia. 12. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2011. 591 p.

KOVALEV, R. et al. Simulation of Longitudinal Dynamics of a freight train operating through a car dumper. **International Journal Of Vehicle Mechanics And Mobility**. [s.i.], p. 1-17. fev. 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1080/00423114.2016.1153115>>. Acesso em: 8 fev. 2017.

MAGALHÃES, Paulo (Org.). **Curso de Prevenção e Investigação de Descarrilamentos de Trens**. Belo Horizonte: Tecnicontrol, 2004.

MRS. **Engates: Principais Tipos e Componentes**. Belo Horizonte: Curso de Especialização em Transporte Ferroviário de Carga, 2008. 24 slides, color.

PROFIDILIS, V. A.. **Railway Engineering**. 2. ed. Hampshire: Ashgate, 2005. 291 p.

ROSA, Paulo Maurício Costa Furtado. Engates: Principais Tipos e Componentes. In: BRANCO, José Eduardo Castello; FERREIRA, Ronaldo (Ed.). **Tratado de Estradas de Ferro**: Material Rodante. Rio de Janeiro: Reflexus Estúdio de Produção Gráfica, 2000. p. 225-233.

ROSA, Paulo Maurício Costa Furtado; SALES, Cezar; SISDELLI, Armando. **Sistema de Choque-Tração**: Juíz de Fora: MRS, 2007. 91 slides, P&B.

SEID, Awel Mohammed. **Structural Analysis and Dynamic Simulation of Heavy Haul Train Coupler with Draft Gear for Rotational Effect**. 2015. 78 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Railway Engineering Program, Department Of Mechanical Engineering, Addis Ababa Institute Of Technology, Addis Ababa, 2015.

SINGH, Anup. Couplers and Draft Gears for Indian Railways. In: NORTHERN BRANCH OF INDIAN CENTRE, 1., 1960, New Delhi. **Paper No. 624**. New Delhi: Indian Centre, 1960. p. 1 - 36.

VALE. **Aparelho de Choque e Tração**. Vitória: Vale, 2008. 44 slides, color.

VALER. **Sistema de Vagões**. Belo Horizonte: Id Projetos Educacionais, 2008.

VITÓRIA, Walter da (Org.). **Inspeção de Vagões**. Vitória: Vale, 2006.

WABTEC CORPORATION. **Freight Car Draft Arrangements**. Wilmerding: Wabtec Corporation, 2003. 21 p.

WICKENS, A. H.. **Fundamentals of Rail Vehicle Dynamics: Guidance and Stability**. Lisse: Swets & Zeitlinger Publishers, 2003. 286 p.

WU, Qing; SPIRYAGIN, Maksym; COLE, Colin. A DYNAMIC MODEL OF FRICTION DRAFT GEAR. In: INTERNATIONAL DESIGN ENGINEERING TECHNICAL CONFERENCES & COMPUTERS; AND INFORMATION IN ENGINEERING CONFERENCE, 1., 2014, Buffalo. **Proceedings...** . Buffalo: Idetc/cie, 2014. p. 1 - 7.

Disponível em:

<https://www.researchgate.net/profile/Qing_Wu11/publication/265602969_A_dynamic_model_for_friction_draft_gear/links/58211f1408ae12715afc07c8.pdf?origin=publication_list>.

Acesso em: 23 maio 2017.